

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.06.08

浙西饱和红黏土的物理力学特性试验研究

李健¹, 孙德安¹, 陈波², 胡云世²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 衢州学院建筑工程学院, 浙江衢州 324000)

摘要: 本文在分析浙西红黏土矿物成分与化学成分的基础上, 分别用单向固结仪和三轴仪对饱和红黏土原状样进行了一系列的压缩、剪切、蠕变试验, 得到其压缩曲线、应力-应变曲线和蠕变曲线。根据测得的压缩曲线, 确定了该土的压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s , 对原状样压缩曲线的归一化整理后判断出原状饱和红黏土的结构性不强; 根据三轴排水剪切试验结果, 得出原状饱和红黏土在不同围压下因结构性的存在土体具有不同的破坏应力比, 计算得到该土的临界状态应力比和黏聚力; 根据原状饱和红黏土在不同固结压力下的蠕变试验结果, 得到了该土的次固结系数 C_{α} 与固结压力关系, 并确定了该土的 C_{α}/C_c 约为 0.0124, 本试验结果为浙西地区的工程建设提供了基本参数。

关键词: 饱和红黏土; 原状样; 压缩试验; 排水剪切试验; 蠕变实验

中图分类号: TU411.2; TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)06-0051-07

An experimental study of the physical and mechanical behavior of the saturated lateritic clay in western Zhejiang

LI Jian¹, SUN Dean¹, CHEN Bo², HU Yunshi²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

Abstract: Based on the mineral compositions and chemical compositions, the basic physical and mechanical behavior of the saturated lateritic clay in western Zhejiang are examined by performing a series of laboratory tests, including compression tests, drained triaxial shear tests and creep tests. The compression index C_c and swelling index C_s are calculated from the compression curves and the soil structure is confirmed by normalized compression curves of undisturbed samples. The stress ratio-strain curves, obtained from the consolidated drained triaxial shear tests, are different at different confining pressures due to the soil structure, and the critical state stress ratio and cohesion are also determined. The changes in secondary consolidation coefficients at different pressures are analyzed and the statistical value of C_{α}/C_c is 0.0124 for the saturated undisturbed lateritic clay. The basic material parameters obtained from the tests can be used for engineering construction in the western Zhejiang area.

Keywords: lateritic clay; undisturbed sample; compression test; drained triaxial shear test; creep test

红黏土是碳酸盐岩风化残坡积并经过红土化作用而形成的棕红、褐黄色的高塑性黏土, 主要分布在北纬 30° 与南 30° 之间的热带与亚热带地区。作为我国区域性分布的特殊土类之一, 它虽然具有较好的力学特

性, 并被普遍认为是良好天然地基和较好的路基填料, 却由于其存在裂隙性、胀缩性和分布不均匀性等问题使工程实践中出现了大量的边坡失稳、地基不均匀变形、道路开裂等工程隐患^[1]。

收稿日期: 2017-06-04; 修订日期: 2017-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41402271)

第一作者: 李健(1993-), 男, 硕士, 主要从事饱和土力学研究。E-mail: 575606865@qq.com

通讯作者: 陈波(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事土力学特性及本构模型的研究工作。E-mail: chenbo20020178@163.com

随着红黏土地区建设工程增多,红黏土的工程性质逐渐被重视,目前国内外学者开展了大量的研究工作。如,肖智政等^[4]研究了残积红黏土的力学特性及原状与重塑土在不同围压下的破坏形式;欧孝夺等^[5]探讨了红黏土抗剪强度与温度之间的相关关系;王洋等^[6]通过试验分析了在含水率变化、干湿交替作用、水化学作用与渗流作用模式下红黏土力学性质的变异性;周远忠等^[7]提出了红黏土微观“集粒”结构模型,并通过该模型对红黏土的工程物理力学特性进行了理论分析、解释和推测;傅鑫晖等^[8]基于大量试验结果,分析了红黏土的水敏性、密实程度与胶结作用对土体抗剪强度的影响,并探究了红黏土的强度机理。然而,国内学者对红黏土虽然开展了广泛研究,并取得了丰富的研究成果,但成果主要集中在广西、贵州等西南地区的红黏土,对其他地区红黏土的研究相对较少。

研究表明,红黏土在漫长而复杂的形成过程中,由于风化与红土化的程度与环境密切相关,红黏土的地质与工程特性会因为地域不同而具有十分明显的差异^[9]。不同地区红土化的程度不同,使得红黏土的化学成分、矿物成分及结构特征等性质也有不同程度的差异^[10]。浙江金衢盆地作为国内红层分布的主要地区之一,其区域内的金华、衢州表层 2 m 内分布有大量的红黏土^[11]。然而,目前国内对该地区的红黏土的物理、力学特性的相关研究成果却极为有限。同时,考虑到该地区的年降雨量较大,导致该层土体的饱和度较大,且考虑到工程设计从安全角度出发,设计参数往往采用饱和土的材料参数。因此,极有必要对浙西饱和红黏土的物理、力学特性进行相关的试验研究,为工程提供必要的材料参数。

本文以浙西地区衢州饱和红黏土为研究对象,首先开展了大量的物理成分及物理特性试验,得到浙西红黏土的矿物成分、化学成分以及其他相关的基本物理特性;随后进行了一系列的单向压缩、固结排水三轴剪切、单向蠕变试验,得到浙西原状饱和红黏土的压缩曲线、应力-应变曲线和蠕变曲线,并计算得到的饱和红黏土的压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 、次固结系数 C_α 等基本模型参数,为工程设计及有限元计算等提供了相关材料参数。

1 试验概况

1.1 试验土样

试验土样取自浙江西部的衢州市西郊,为得到该地区典型的均匀红黏土,选择取土深度为地表以下

1.5 m 左右,并采用块状取样方式得到高质量的试验原状样。即,将土坑挖到 1.3 m 深度后,通过人工切削得到尺寸约为 20 cm × 20 cm × 20 cm 的块状土样。为防止存储过程中红黏土的水分蒸发而导致含水量发生较大变化,将取好的土样外包装 2 层保鲜膜后再包上 1 层锡箔,最后在锡箔外包装上 1 层棉布,并及时涂上熔化的石蜡后储存于密闭容器中,根据试验需要切取相应的试样。土样的基本物理指标见表 1。

表 1 浙西红黏土的基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of the lateritic soil

指标	取样深度/m	天然含水量/%	颗粒比重 G_s	液限 W_L /%	塑限 W_p /%	塑性指数
数值	1.5	25.9 ~ 27.0	2.73	41.1	18.5	22.6

通过 X 射线衍射仪 XRD (X Ray diffraction) 对红黏土中的矿物成分进行分析测试,结果如图 1 所示。从图 1 中可知,该红黏土的主要矿物成分为高岭石、伊利石、蛭石和蒙脱石。通过定量计算红黏土衍射峰的强度和半高宽,可以得出红黏土的矿物成分的具体含量(表 2)。从表 2 中可以看出,浙西红黏土的黏土矿物中高岭石的含量最高,占 39.75%,含量低于广西桂林红黏土 56.59% 的高岭石含量,但明显高于贵州红黏土 4.2% ~ 17.1% 的高岭石含量^[12~13]。此外,XRD 试验结果显示,浙西红黏土蒙脱石含量高达 11.25%,明显高于贵州红黏土最高 3.1% 的蒙脱石含量和桂林红黏土最高 6.4% 的蒙脱石含量^[12~13]。由于蒙脱石是红黏土产生胀缩性的主要矿物成分,其含量大小对土体的胀缩性具有决定性作用,因此,浙西红黏土的胀缩性大于西南地区的红黏土。

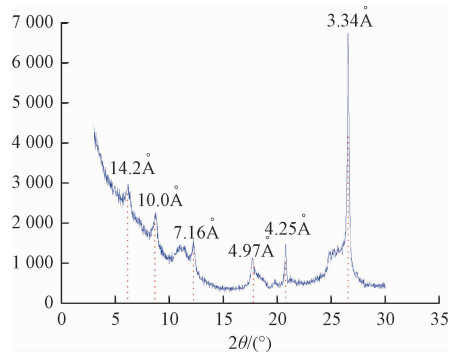


图 1 红黏土 X 射线衍射图

Fig. 1 X ray diffraction of the lateritic soils

表 2 红黏土的矿物成分

Table 2 Mineral compositions of the lateritic soil

黏土矿物	高岭石	伊利石	蛭石	蒙脱石
相对含量/%	39.75	25	24	11.25

通过 X 射线荧光光谱 XRF(X Ray Fluorescenc-e)测定分析浙西红黏土的化学成分,如表 3 所示。从表 3 可看出,浙西红黏土化学成分以 SiO_2 为主,占比达到了 65% 左右,远远高于桂林地区红黏土 38.8% 的 SiO_2 含量,与贵州地区部分红黏土 67.4% 的 SiO_2 含量较为接近^[12~13];同时,浙西红黏土只有 3.63% 的 Fe_2O_3 含量,明显小于桂林红黏土高达 14.03% 的 Fe_2O_3 含量和贵州红黏土高达 13.10% 的 Fe_2O_3 含量^[12~13]。然而,该土样的化学成分与毗邻地江西崇抚地区红黏土化学成分较为接近^[14]。

表 3 红黏土的化学成分

Table 3 Chemical compositions of the lateritic soil							
化学成分	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
含量/%	22.26	3.63	64.97	0.514	1.67	2.14	0.197

红黏土颗粒级配曲线和击实曲线分别如图 2 和图 3 所示。从图 2 中可知,该红黏土的粒径主要分布在 0.05~1.0 mm 的范围内,比例高达 78.1%。同时,粒径小于 0.075 mm 的颗粒累计含量占 52.45%,相比于桂林红黏土^[13],其粗颗粒含量明显偏多,说明该地区红黏土的颗粒总体偏粗。从图 3 中可以看出,浙西红黏土的最优含水率为 17.5% 左右,此时能达到的最大干密度约为 1.68 g/cm^3 。

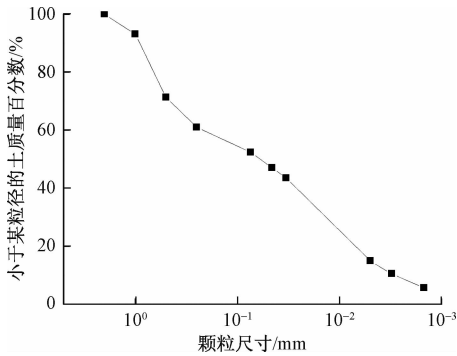


图 2 红黏土颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of the lateritic clay

1.2 试验方法

由于取土时红黏土长期处于晴朗、干燥气候条件下,在天然状态下的饱和度约 70% 左右,为非饱和土。因此,开展饱和土试验前,需要对制好的试样进行饱和。本文采用抽气饱和法^[15]进行饱和。将装有试样的碟式饱和器放入真空缸内,抽气 2 h 后,使清水徐徐注入真空缸内,待水浸没饱和器后停止抽气,静止 10 h,饱和后试样饱和度都能达到 95% 以上。

(1) 常规压缩试验

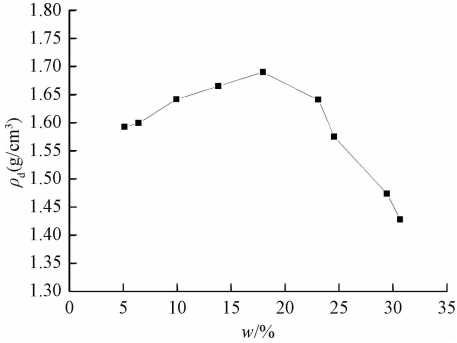


图 3 红黏土的击实曲线

Fig. 3 Compaction curve of the lateritic clay

用环刀切取直径 $d=61.8\text{ mm}$ 、高 $h=20.0\text{ mm}$ 土样。将试样连同环刀装入固结容器中,按 1:1 加载比例分级加载至 1 600 kPa,每级荷载的固结时间为 24 h。

(2) 排水剪切试验

将土样切成直径 $d=39.1\text{ mm}$ 、高 $h=80.0\text{ mm}$ 的三轴试样,装入三轴压力室中进行分级加载。为了减小试样因端部摩擦而引起的套箍效应,采用中间剪有小孔、涂有硅脂的橡皮膜来代替透水石,这样可减少试样端部摩擦,使试样的变形比较均匀。同时为了加快试验时土体的排水速度,在试样四周贴上滤纸条,并在试样上下两端面分别放上 1 张滤纸。试验时,4 个试样的围压分别等向加载到 50,100,200,400 kPa,并在目标压力下固结 48 h 后开始排水剪切试验。为了保证剪切过程中土体产生的超孔隙水压力全部消散,试验采用慢剪的形式剪切,轴向速率控制在 0.0022 mm/min 进行排水剪切试验,三轴剪切 1 次需要 4 天左右的时间。

(3) 单向压缩蠕变试验

用环刀切取 $d=61.8\text{ mm}$ 、高 $h=20.0\text{ mm}$ 土样,将试样连同环刀装入固结容器中,再按 1:1 分级加载,每级加载 24 h。8 个土样的最后一级荷载分别为 25,50,100,200,400,800,1 200,1 600 kPa。在土样的最后一级荷载下进行蠕变试验,并在此荷载下分别按 1,2,4,8,16,⋯ min 方式记录竖向位移读数。

2 试验结果与分析

2.1 压缩试验结果

(1) 压缩试验结果

图 4 为 3 次原状饱和红黏土和 2 次重塑土饱和红黏土的单向压缩试验结果。从图 4 中可以看出,原状饱和红黏土压缩曲线为 1 条具有明显屈服应力的曲线。在结构屈服应力之前,土体的压缩量变化比较小,当固结压力超过土的结构屈服应力时,其压缩性明显

增大。根据压缩试验,利用卡萨格兰德法提出的经验作图法可以确定原状红黏土的结构屈服应力为 94.5 kPa。计算 3 条压缩曲线的直线部分斜率可以求得压缩指数 C_c 的值分别为 0.196, 0.198, 0.206, 平均值为 0.200。根据回弹-再加载部分的直线斜率可求出饱和原状红黏土的膨胀指数 C_s 分别为 0.023, 0.022, 0.023, 平均值为 0.023。

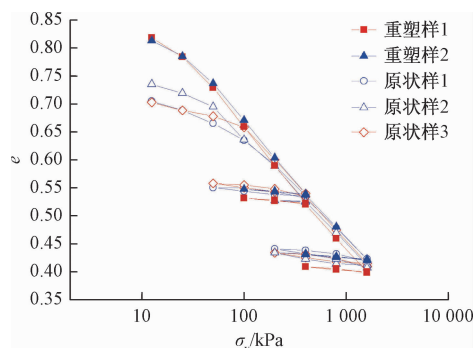


图4 单向压缩试验的 $e-\log \sigma_v$ 曲线

Fig. 4 $e-\log \sigma_v$ curves obtained from the oedometer tests

(2) 压缩结果的归一化整理

由于重塑样的力学特性与其存在的天然状态基本没有关联,只反映土体的基本力学特性,因此重塑样的力学特性称之为土的固有力学特性。Burland^[16]认为原状土样所具有的力学特性可以看成是其相应重塑样的力学特性与土体的结构性综合作用结果。为了定量评价天然土体的压缩性质,Burland 引入式(1)所示的孔隙指数 I_v (Void index) 对不同的重塑样压缩曲线进行归一化后发现,不同土体重塑土的压缩曲线大致归一化为 1 条光滑曲线,Burland 称其为土的固有压缩曲线 ICL (Intrinsic Compression line):

$$I_v = \frac{(e - e_{100}^*)}{(e_{100}^* - e_{1000}^*)} = \frac{(e - e_{100}^*)}{C_c^*} \quad (1)$$

式中: e_{100}^* , e_{1000}^* ——重塑土在 100, 1 000 kPa 固结压力下的孔隙比;

C_c^* ——重塑土的压缩指数。

为了定量描述结构性对天然土压缩特性的影响,对图 4 中原状样和重塑样压缩曲线进行归一化整理,得到图 5 的归一化压缩曲线。从图 5 中可看出,当固结压应力大于土的前期固结压应力时,浙西红黏土重塑样的压缩曲线大致相同,且与重塑样的固有压缩曲线 ICL 线基本重合。原状土压缩曲线则位于固有压缩曲线 ICL 和自然沉积线 SCL (Sedimentary Compression Line) 之间,这表明浙西原状红黏土的结构性较弱。

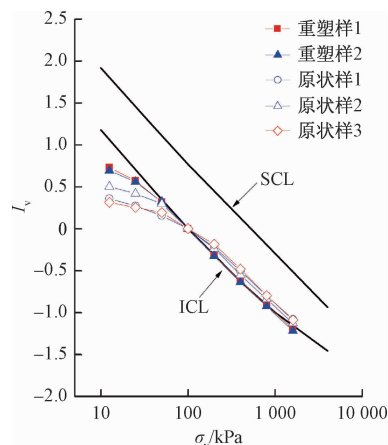


图5 原状样和重塑样的归一化压缩曲线

Fig. 5 Normalized intrinsic compression curves of undisturbed and reconstituted samples

2.2 剪切试验结果

图 6 是浙西原状饱和红黏土在不同围压下,三轴排水剪切试验得到的应力比-应变-体变曲线,图 6 中, ε_a 和 ε_v 为轴向应变和体积应变, σ_a/σ_r 为应力比。

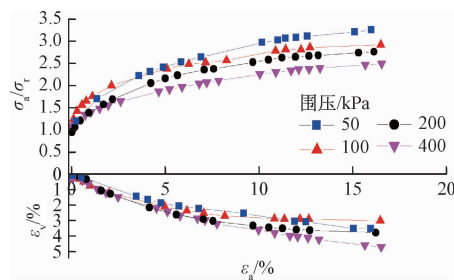


图6 不同围压下的应力-应变-体变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves under different confining pressures

从图 6 中可看出,不同围压得到的黏土应力-应变曲线均具有明显的非线性特征,且表现出明显的应变硬化现象。体变则随剪切应变增加而逐渐增大,具有明显的剪缩现象。在剪切过程中,临界状态强度的应力比随围压的增大而减小。

图 6 还表明,不同围压下剪切得到的原状样应力比-应变曲线并不相同,相同应变下的应力比 σ_a/σ_r 值随着剪切围压的增大而减小,这一方面是由于不同的剪切围压对原状样中的结构性造成不同程度的破坏,另一方面则是由于原状红黏土存在的氧化铁,会使土体具有不同程度的黏聚力。

为计算浙西饱和红黏土的临界状态应力比 M 和黏聚力 c ,将图 6 得到的试验结果进一步整理后,可到图 7 所示的红黏土的 $p-q$ 曲线,从图 7 中可以看出,该土体的强度包线并不经过原点,说明土体具有一定的

黏聚力 c , 且得到其黏聚力 $c = 16.5 \text{ kPa}$ 。计算直线段的斜率后得到, 浙西原状饱和红黏土临界状态应力比 $M = 1.122$, 通过换算得出其内摩擦角 $\varphi = 26.7^\circ$ 。浙西红黏土的黏聚力和内摩擦角均略大于桂林红黏土, 较为接近贵州红黏土^[12~13]。

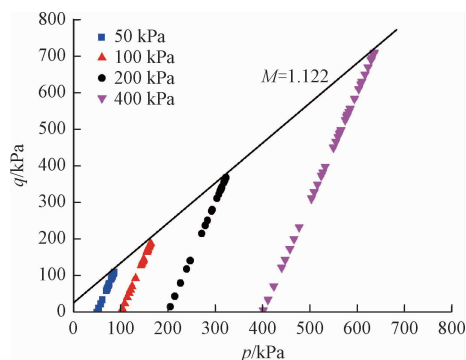


图7 剪切试验得到的 p - q 曲线

Fig. 7 p - q curves obtained from the drained shear tests

2.3 次固结试验结果

图8为根据浙西原状饱和红黏土一维固结蠕变试验得到的 e - $\log t$ 曲线。该曲线表示了原状浙西红黏土在荷载作用下的固结变形过程。

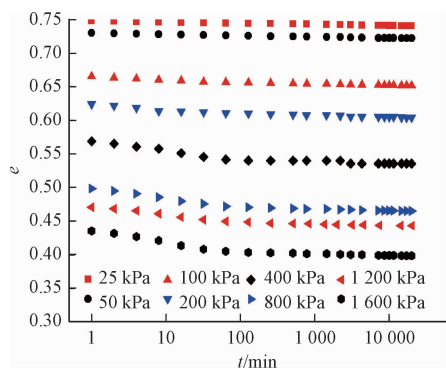


图8 原状饱和红黏土的蠕变曲线

Fig. 8 Creep curves of the undisturbed saturated lateritic clay

从图8可看出, 当固结压力小于土的结构屈服应力 (94.5 kPa) 时, 原状红黏土在整个固结过程中变形很小, 结构性没有被破坏, 结构强度阻碍了土体在外荷载作用下产生的变形, 土颗粒之间也没有产生明显的滑移, 土体骨架的蠕变变形亦不显著, 次固结不明显。当外加荷载超过土体的结构屈服应力时, 土体的结构性开始破坏, 进入塑性变形阶段, 在外荷载的持续作用下, 土体内部的结构不断发生软化, 结构性强度不断降低, 从而使变形不断加剧, 曲线上表现出主次固结分界明显。随着固结时间的增加, 土颗粒之间的滑移及土骨架的调整逐渐稳定, 土体愈加密实, 次固结变形越来越小。

通过试验曲线反弯点的切线和下部直线段引伸线的交点确定主固结完成的点后, 利用式(2)可计算确定各固结压力下的次固结系数 C_a , 用于反映红黏土的次固结特性:

$$C_a = \frac{-\Delta e}{\lg t_2 - \lg t_1} \quad (2)$$

式中: Δe ——次固结压缩阶段的孔隙比变化;

t_1 ——主固结完成时刻;

t_2 ——压缩量计算时刻。

3 次固结系数影响因素分析

3.1 次固结系数与固结压力的关系

对于土的次固结系数与固结压力之间的关系, 国内外研究人员已开展了大量试验研究并取得了丰富的试验结果。有的学者认为土的次固结系数和土的最终固结压力无关, 而与荷载增量比有关^[17]。有的学者则认为土的次固结系数和土的荷载增量比无关, 但与土的最终固结压力有关^[18]。由于试验加载过程中采用的是统一增量比, 因此, 本文依据上述试验结果, 重点分析研究浙西原状饱和红黏土次固结系数与固结压力之间的关系。

将不同固结压力下计算得到的浙西原状饱和红黏土的次固结系数整理成图9。由图9可知, 对于原状红黏土, 在压力较小时, 原状饱和红黏土次固结系数均随着压力的增大而增大, 并在 200 kPa 左右达到最大。而后随着压力的增大, 红黏土的次固结系数基本保持不变, 甚至还有略微小幅减小。本文得到的次固结系数最大值不是出现在前期固结压力值的附近, 而是略大于前期固结压力, 此结论与孙德安等^[19]得出的结论一致。其原因可解释为: 对于结构性黏土而言, 土体的胶结结构能够在一定程度上约束土骨架的蠕变变形, 而且红黏土中游离氧化物对胶结作用的产生也有一定的贡献, 且胶结性越强, 对次固结变形的阻碍越强, 从而表现出固结压力小于土体结构屈服应力时, 土体的变形较小, 从而使土体的次固结系数较小。当固结压力逐渐地增大, 超过土体的结构屈服压力时, 随着土体的胶结结构逐渐破坏, 次固结系数继续增大。但结构性破坏较大时, 胶结作用对次固结的阻碍逐渐减弱甚至消失, 从而使次固结系数随压力增加而逐渐减小。

3.2 次固结系数与压缩指数的关系

Mesri 等^[20]总结了 22 种黏土的次固结试验结果后发现, 对于同一种原状土, 次固结系数与压缩指数的

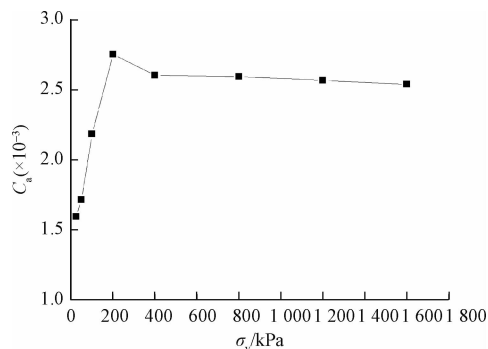
图9 次固结系数 C_a 与固结压力 σ_c 关系

Fig. 9 Relationship between the coefficient of secondary consolidation and consolidation pressure

比值 C_a/C_c 是一个常数,其值在 0.025 ~ 0.1 之间。由于用试验方法确定 C_a 的工作量大,且有一定的人为误差,但采用 C_a/C_c 确定 C_a 则更加简单和准确,为确定本构模型参数或工程设计服务。

为分析浙西红黏土的次固结系数 C_a 与压缩指数 C_c 的比值关系,将图 9 中得到的次固结系数进一步整理后,可得到图 10 所示的 C_a-C_c 关系图。从图 10 可以看出,虽然由于结构性的影响,土体的次固结系数在结构屈服应力前较小,但是土体结构性对土体的压缩指数也有极大的影响,因此,浙西饱和红黏土的 C_a 与 C_c 基本满足线性关系,且总体而言,两者的相关性较好。通过试验数据的拟合曲线分析得到 C_a/C_c 的比值近似为 0.0124,且两者的相关系数达到 0.933。

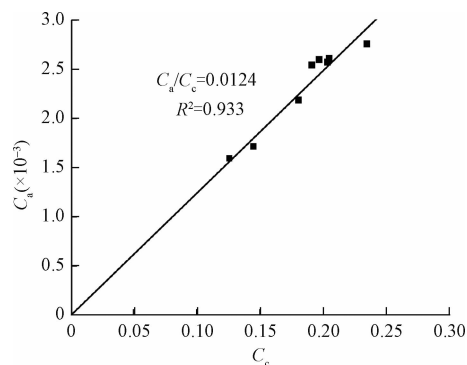


图10 次固结系数与压缩指数的关系

Fig. 10 Relationship between the coefficient of secondary consolidation and compression index

4 结论

(1)对浙西原状饱和红黏土进行了系列物理特性和力学特性的试验研究,得到了压缩指数 C_c 、膨胀指数 C_s 、次固结系数 C_a 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等力学参

数,弥补该地区的材料参数空白。

(2)浙西红黏土的黏土矿物主要为高岭石,且其蒙脱石含量也较高。化学成分主要为二氧化硅,且氧化铁的含量占比不高。粒径小于 0.075 mm 的颗粒累计含量占 52.45%,土体颗粒相对较粗。在 17.5% 的最优含水率下的最大干密度约为 1.68 g/cm³。

(3)浙西饱和红黏土的前期固结压力约 94.5 kPa,压缩指数 C_c 约为 0.20,膨胀指数 C_s 为 0.023;临界状态应力比 $M = 1.122$,黏聚力 $c = 16.5$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 26.7^\circ$ 。

(4)压力小于前期固结压力时,次固结系数随着压力的增加而较快地增大,超过前期固结压力后随着压力的增加次固结系数开始减小,逐渐趋向一稳定值。浙西红黏土次固结系数和压缩指数的比值 C_a/C_c 基本上是常数 0.0124。

参考文献:

- [1] 孔令伟,陈正汉.特殊土与边坡技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(5):141-161. [KONG L W, CHEN Z H. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 45(5): 141-161. (in Chinese)]
- [2] MADU R M. An investigation into the geotechnical and engineering properties of some laterites of eastern Nigeria[J]. Engineering Geology, 1977, 11: 101-125.
- [3] GAO G R. The distribution and geotechnical properties of loess soils, lateritic soils and clayey soils in China[J]. Engineering Geology, 1996, 42: 95-104.
- [4] 肖智政,刘宝琛.残积红黏土的力学特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(7):990-993. [XIAO Z Z, LIU B S. Experimental study on mechanical strength of residual laterite[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 990-993. (in Chinese)]
- [5] 欧孝夺,吴恒,周东.广西红黏土和膨胀土热力学特性的比较研究[J].岩土力学,2005,26(7):1068-1072. [OU X D, WU H, ZHOU D. Comparative study on thermodynamics characteristics of red clay and expansive soils in Guangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1068-1072. (in Chinese)]
- [6] 王洋,汤连生,高全臣,等.水土作用模式对残积红黏土力学性质的影响分析[J].中山大学学报

- (自然科学版), 2007, 46 (1): 128 - 132. [WANG Y, TANG L S, GAO Q C, *et al.* Effects of water-soil interaction on mechanical strength of residual red clay [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46 (1): 128 - 132. (in Chinese)]
- [7] 周远忠, 刘新荣, 张梁, 等. 红黏土微观结构模型及其工程力学效应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 726 - 731. [ZHOU Y Z, LIU X R, ZHANG L, *et al.* Study of micro-structure model of red clay and its engineering mechanical effect[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8 (4): 726 - 731. (in Chinese)]
- [8] 傅鑫晖, 颜荣涛, 于海浩, 等. 红黏土的强度机理[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(4): 691 - 696. [FU X H, YAN R T, YU H H, *et al.* The strength mechanism of red clay[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2014, 34(4): 691 - 696. (in Chinese)]
- [9] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568 - 572. [ZHAO Y W, KONG L W, GUO A G, *et al.* Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 568 - 572. (in Chinese)]
- [10] 黄质宏, 朱立军, 廖义玲, 等. 不同应力路径下红黏土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2059 - 2063. [HUANG Z H, ZHU L J, LIAO Y L, *et al.* Mechanical properties of red clay under different stress paths [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23 (15): 2059 - 2063. (in Chinese)]
- [11] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 34(7): 34 - 40. [CHENG Q, KOU X B, HUANG S B, *et al.* The distribute and geologic environment characteristics of red beds in China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 34(7): 34 - 40. (in Chinese)]
- [12] 梁毅, 董杰霜. 贵州红黏土路用工程性能研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2011, 12(4): 28 - 31. [LIANG Y, DONG J S. Research on engineering characteristics of red clay in road construction of Guizhou province [J]. *J. Changchun Inst. Tech. (Nat. Sci. Edi.)*, 2011, 12(4): 28 - 31. (in Chinese)]
- [13] 王经. 桂林红黏土工程性质研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2012. [WANG J. *The Study on Engineering Properties of Red Clay in Guilin* [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2012. (in Chinese)]
- [14] 王平, 彭人勇, 周萍华. 陶器资源——江西红土岩开发[J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(2): 131 - 134. [WANG P, PENG R Y, ZHOU P H. Developing the Jiangxi Red-Mudstone: A kind of Pottery Resource [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 2001, 24(2): 131 - 134. (in Chinese)]
- [15] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [GB/T50123—1999 *Geotechnical Engineering Test Method and Criterion* [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)]
- [16] BURLAND J B. On the compressibility and shear-strength of natural clay[J]. *Géotechnique*, 1990, 40 (3): 329 - 378.
- [17] SCHOFIELD A N, WROTH C P. Critical state soil mechanics [M]. London: Mcgraw-Hill, 1968: 139 - 173.
- [18] 高彦斌, 朱合华, 叶观宝, 等. 饱和软黏土一维次压缩系数 C_a 值的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 459 - 463. [GAO Y B, ZHU H H, YE G B, *et al.* The investigation of the coefficient of secondary compression C_a in odometer tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 459 - 463. (in Chinese)]
- [19] 孙德安, 申海娥. 上海软土的流变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 74 - 78. [SUN D A, SHEN H E. Experimental study on rheology behaviour of Shanghai soft clay [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(3): 74 - 78. (in Chinese)]
- [20] MESRI, GODLEWSKI P M. Time and stress-compressibility interrelationship [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1977, 103 (5): 417 - 430.

责任编辑: 张明霞