

# 高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性

陈晓平<sup>1</sup>, 周秋娟<sup>1,2</sup>, 蔡晓英<sup>3</sup>

(1. 暨南大学理工学院, 广东 广州 510632; 2. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635; 3. 广东省公路勘察规划设计院, 广东 广州 510506)

**摘要:** 高液限花岗岩残积土广泛分布于华南地区, 针对其中的含粗粒细粒土进行了物理特性和剪切强度特征的试验研究, 包括土的组成和微观结构、土的物理状态、土的峰值强度和残余强度等。基于试验结果分析了细粒含水率及对土体物理状态的影响, 归纳了土中粗粒含量与天然含水率之间、土的天然状态指标与抗剪强度参数之间的统计规律, 探讨了应用反复剪切试验方法确定此类土残余强度的注意事项及大剪切位移时的剪应力特征。由于此类残积土具有高液限土和粗粒土的综合特征, 因而需基于粗粒含量的影响来认识有关基本特性。

**关键词:** 高液限土; 花岗岩残积土; 含粗粒细粒土; 细粒含水率; 残余强度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)06-0901-08

**作者简介:** 陈晓平(1957-), 女, 山东青岛人, 教授, 主要从事土力学与基础工程教学与科研工作。E-mail: chenxp@jnu.edu.cn.

## Physical properties and shear strength characteristics of high liquid limit granite residual soil

CHEN Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHOU Qiu-juan<sup>1,2</sup>, CAI Xiao-ying<sup>3</sup>

(1. Institute of Technology of Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China; 3. Guangdong Highway Survey, Planning and Design Institute, Guangzhou 510506, China)

**Abstract:** High liquid limit granite residual soil (GRH) is widely distributed over South China. The physical properties and shear strength characteristics of the fine grained soil containing coarse of GRH are studied, including the natural components and soil fabric, physical features and indexes, shear peak strength and residual strength, etc. Based on a series of laboratory tests, the fine grain moisture content and its influences on liquidity index are analyzed, and the statistic relationships between coarse-grain content and field moisture as well as the physical indexes and shear strength parameters are also generalized. Through repeated direct shear tests, the major points for determining the residual strength by such test methods are discussed, and correspondingly, the typical shear curves of resistance at relatively large shear displacement are analyzed. The residual soil has combinational characteristics of both high liquid limit soil and coarse-grained soil, so it is important to understand its basic properties by studying the effects of coarse grain content.

**Key words:** high liquid limit soil; granite residual soil; fine grained soil containing coarse; fine grain moisture content; residual strength

## 0 引言

高液限花岗岩残积土指液限大于 50%、覆盖于花岗岩体表面的一种风化残积土, 在华南地区分布相当广泛。此类土具有一般残积土特征, 如结构性较强, 天然状态时具有较好的力学特性, 水稳定性较差等, 同时又具有高液限土典型特征, 如含水率高、孔隙比大等。另外, 虽然此类土的孔隙比与软土相似, 但其压缩性却低于软土, 强度高于软土, 说明其力学特性并不完全取决于土中孔隙。在有临空面的浸水条件下, 此类土极易因水的作用而软化崩解、造成工程坍塌, 给开挖工程的稳定及公路建设带来不利影响。

由于实际工程的大量遭遇, 学术界和工程界对于花岗岩残积土和一般高液限土的工程特性都有所关注。花岗岩残积土曾被作为一种黏性土, 早期也有学者将南方花岗岩残积土归于某类红土, 后来发现其结构强度和工程特性比较异常, 既不同于一般黏性土, 又与一般红土有较大差异<sup>[1-3]</sup>。之后逐渐将花岗岩残积土作为单独的一类特殊土进行研究<sup>[4-8]</sup>, 国外一些残积土的研究成果和原位试验的结果也对揭示花岗岩残积

表1 颗粒组成

Table 1 Particle component

土的名称	试验组数	粒径 $d$ 含量的均值和分布范围 / %					
		>5.0 mm	5.0~2.0 mm	2.0~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm
含砂高液限黏土	20	10.1 /0~24.8	6.9 /0.3~15.4	14.0 /5.0~23.8	6.3 /2.0~10.1	4.8 /1.5~12.8	64.0 /50.5~74.4
含砾高液限黏土	3	10.9 /10~11.4	16.8 /8~17.4	7.6 /5.5~9.4	4.4 /2.6~8	3.8 /3~5.4	54.5 /53.8~57.2
含砂高液限粉土	19	5.2 /0~10.2	6.5 /1.0~11.8	13.8 /7.3~26.1	5.9 /3.2~10.7	4.4 /2.0~10.3	66.6 /53.6~74.8
含砾高液限粉土	9	12.1 /8.2~17.8	13.9 /9.6~17.6	12.0 /8.5~14.6	2.1 /1.0~3.0	1.6 /0.0~2.9	58.3 /54.1~63.2

土的力学特性有较大的帮助<sup>[9-10]</sup>。另外关于高液限土的研究主要集中于作为路堤填料的路用特性及其改良措施<sup>[11-12]</sup>。

高液限花岗岩残积土兼具高液限土的特征和某些粗粒土特征。由于花岗岩残积土原状样不易采样,因而室内试验的可行性和成果的可靠性一直倍受困扰,而高液限土研究又较少针对粗粒含量较高的细粒土,所以针对高液限花岗岩残积土基本特性的认识一直留有较大研究空间,同时也是华南地区公路建设和各类开挖工程面临的难题。

广梧高速公路十八标段沿线大范围分布高液限花岗岩残积土,土类大多属高液限含砂(砾)细粒土,本文基于大量的试验和试验成果分析进行了有关特性的研究,包括土的组成、土的微观结构、土的剪切特性、残余强度特性等,重点关注了此类土中粗粒含量对物理力学特性的影响。

## 1 土的组成及微观结构

### 1.1 颗粒组成

高液限花岗岩残积土的重要特征之一是土中粗粒含量较高,根据土的工程分类大多属于粗粒土和含粗粒细粒土。表1为根据4种含粗粒细粒土的颗粒分析试验成果整理得出的粗颗粒分布情况,土体多为中-细粒花岗岩风化而成的混合土,中间粒径(0.5~0.075 mm)含量相对较少。

### 1.2 矿物成分及微观结构

广东地区高液限花岗岩残积土中的粗粒大多为石英颗粒,细粒土中( $d < 0.075$  mm)的次生矿物以高岭石为主,可达70%~94%,另有少量伊利石(6%~23%),蒙脱石极为少见<sup>[13]</sup>。

取表1中含砾高液限黏土试样风干碾散后过0.075 mm筛,然后进行X射线衍射鉴定可发现细粒土中的黏土矿物成分为:高岭石87%,伊利石含量5%,伊利石-蒙脱石混层占8%、其中蒙脱石约占混层含量的10%。

同时取含砾高液限黏土试样结构保存完好的原状

样进行电镜扫描可观察到土样的微观结构如图1所示。土样排列略显杂乱、呈絮状,粗细不等的石英颗粒散布于黏土矿物之间、被细粒包裹,基本集合体由片状单元彼此重叠而成。结构比较疏松,集合体间存在大量孔隙。

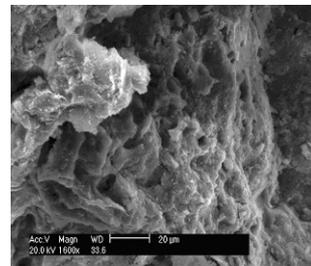


图1 电镜扫描试验结果(1600倍)

Fig. 1 Result of scanning electron microscope test (multiplied by 1600)

由于粗颗粒的存在会对黏粒的亲水性和膨胀性产生抑制作用,所以高液限花岗岩残积土虽然具有疏松的微观结构,但试验结果表明相对于与其他高液限粉土和黏土来说黏性与膨胀性都不明显,这是与其他高液限土的重要区别之一。

## 2 土的物理状态

### 2.1 细粒含水率及液性指数

在粗细粒混杂的花岗岩残积土中,由于细粒土的比表面积大、矿物成分多为亲水的黏土矿物而使水分多集中于细粒土上,石英质粗粒土上仅为少量附着水。所以,按照一般黏性土的常规试验方法测定天然含水率时可能因土中 $d > 0.5$  mm颗粒含量较高而偏低,而用 $d < 0.5$  mm的颗粒测定液塑限时又可能因筛除的粗粒比例较高而使结果偏大,从而使计算的液性指数 $I_L$ 偏小,描述的物理状态与实际不符。所以,评价花岗岩残积土物理状态时应考虑粗粒含量的影响,采用能反映土中细粒土部分的天然含水率。现行规范建议引入细粒含水率这一重要参数,根据 $d > 0.5$  mm的颗粒含量按下式计算残积土细粒天然含水率 $w_f$ 和液性指数 $I_L$ <sup>[14-15]</sup>:

表 2 土的稠度状态指标统计规律

Table 2 Statistical laws of consistency state indexes

土样名称	试验组数	统计规律 (均值/范围) %				细粒含水率/%		液性指数	
		w	$P_{0.5}$	$w_L$	$w_p$	$w_A$	$w_f$	$I_L^*$	$I_L$
含砂高液限黏土	24	26.9 /19.7~35.1	24.9 /14.0~39.5	56.9 /50.9~72.1	27.6 /22.2~34.0	13	31.5	0.00	0.13
含砾高液限黏土	3	30.8 /30.3~32.5	37.0 /36.6~38.2	61.9 /60.2~66.6	31.6 /31.6~32.6	13	41.2	-0.01	0.32
含砂高液限粉土	22	32.9 /21.6~47.1	23.1 /8.6~36.9	58.1 /50.7~78.1	33.5 /29.1~45.3	10	39.8	-0.02	0.26
含砾高液限粉土	9	26.6 /16.7~36.3	38.1 /32.1~41.9	67 /56.3~74.7	31.8 /31.8~41.8	10	36.8	-0.24	0.24

$$w_f = \frac{w - w_A \cdot 0.01P_{0.5}}{1 - 0.01P_{0.5}}, \quad (1)$$

$$I_L = \frac{w_f - w_p}{w_L - w_p}. \quad (2)$$

式中  $w$  为土体的天然含水率;  $P_{0.5}$  是土中粒径  $d > 0.5$  mm 颗粒质量占总质量的百分比;  $w_A$  为土中粒径  $d \geq 0.5$  mm 颗粒的吸着水含水率, 与颗粒比表面积有关, 根据广东地区花岗岩残积土研究结果<sup>[16-17]</sup>和本文的试验结果发现其值受  $d > 0.5$  mm 颗粒分布等因素影响明显, 分布范围在 5%~20% 之间。

表 2 为根据试验结果列出的物理状态指标统计规律, 其中  $w_A$  根据试验土样的塑性指数、天然含水率及  $P_{0.5}$  的综合影响对于黏性土取 13%, 对于粉土取 10%。

结果表明, 由于高液限花岗岩残积土的粗粒含量较高, 所以虽然从试验结果看似也具有一般高液限细粒土的高含水率、高液限及塑性指数较高的特征, 但进一步分析可发现由这些指标构成的土样描述与试验土样的实际状态是有较大差异的, 如塑性指数较高却对应了土中黏粒含量不高 (一般 < 30%)、且蒙脱石极少; 由天然含水率计算得到的液性指数 (表中  $I_L^*$ ) 表明土体处于坚硬状态与土样实际状态不吻合等。所以, 对于高液限花岗岩残积土物理状态的评价需要考虑土中粗粒含量的影响。表 2 中通过式 (1) 所确定的细粒含水率对液限指数修正后 (表中  $I_L$ ) 可得到土体处于硬塑 / 可塑状态, 与土样实际物理状态吻合。

应指出的是, 由于粒径  $d > 0.5$  mm 的颗粒吸着含水率  $w_A$  的测定方法目前还缺乏统一试验标准, 且试验结果与  $d > 0.5$  mm 的颗粒分布有关、离散性比较大, 所以, 虽然考虑细粒含水率在理论上正确, 但在试验标准上还有待完善, 以提高考虑细粒含水率后的物理状态指标的可靠性。

### 2.2 粗粒含量对试验结果的影响

图 2 为含砾高液限黏土的击实试验结果 ( $r_d = 1.60$  g/cm<sup>3</sup>,  $w_{op} = 22.6\%$ )。陡型的击实曲线表明击实作用对含水率的变化非常敏感, 土体的水稳性较差。对比表 2 的液塑限试验结果可知土样的最优含水率明显低于塑限, 这一试验结果进一步表明采用常规黏性土

的稠度试验方法确定花岗岩残积土液塑限是不可靠的, 试验中对土样进行过筛剔粗将对试验结果产生直接影响, 导致土体的物理指标及与之有关的物理状态指标的失真。所以, 对于此类残积土来说, 不考虑粗粒含量的影响很难反映土体的本质特征。

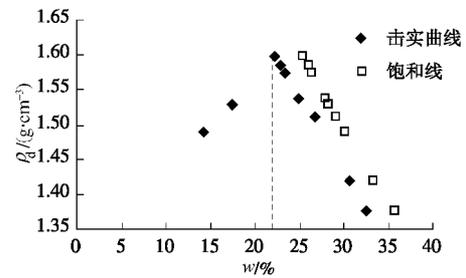
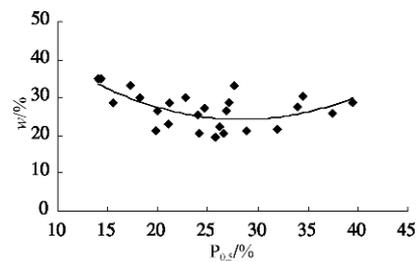


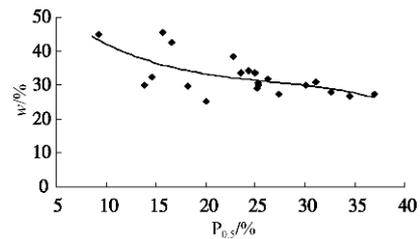
图 2 含砾高液限黏土干密度 - 含水率关系

Fig. 2 Relationship between dry density and water content of CHG

图 3 为根据试验结果统计得出的  $d > 0.5$  mm 粗粒含量  $P_{0.5}$  对天然含水率的影响。砾粒及以上颗粒对土体天然含水率的影响与土体细粒含量有关, 对于黏性土, 其影响存在极小值, 而对于粉土, 则随着  $P_{0.5}$  的增加呈现单调下降规律。这说明应用细粒天然含水率公式 (1) 时需考虑其适用土类, 对于粉土类是不太合适的。



(a) 含砂高液限黏土



(b) 含砂高液限粉土

图 3  $d > 0.5$  mm 粗粒含量对天然含水率的影响

Fig. 3 Influences of coarse-grained content on natural moisture content ( $d > 0.5$  mm)

图4为  $d>0.075\text{ mm}$  粗粒总含量  $P_{0.075}$  对天然含水率的影响, 相应的粗粒组分布规律可参见表1。与图3相比, 此统计规律虽然对于不同的细粒土也有所不同, 但对天然含水率的影响都呈“低大高小”的趋势, 即当粗粒含量少于某一界限值  $P_{cr}$  时随着粗粒含量的增加天然含水率降低比较明显、当粗粒含量继续增加后其影响渐弱, 其中粉土的这一趋势较黏性土更强。所以, 粗粒含量对天然含水率的影响集中于  $25\% \sim P_{cr}$  范围,  $P_{0.075}>P_{cr}$  后按  $P_{0.075}=P_{cr}$  处理。根据本文试验成果  $P_{cr}$  为  $35\% \sim 38\%$ 。

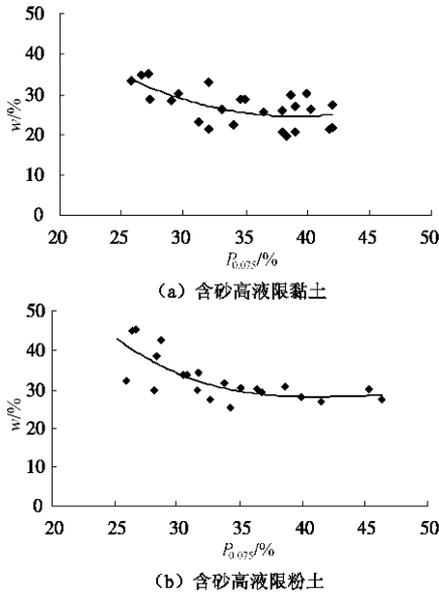


图4  $d>0.075\text{ mm}$  粗粒含量对天然含水率的影响

Fig. 4 Influences of coarse-grained content on natural moisture content ( $d>0.075\text{ mm}$ )

### 3 土的峰值强度

#### 3.1 统计规律及分析

表3为通过直接剪切试验获得的原状土强度指标的统计规律, 由于此类原状土的取土质量较低、土体沿深度和沿水平面变异性较大等原因, 所以试验结果比较离散。图5~7是针对其中含砂高液限黏土试验结果作出的描述土体天然状态的指标(初始含水率  $w_0$ 、初始孔隙比  $e_0$ 、及粗粒含量  $P_{0.075}$ ) 对抗剪强度指标的影响趋势。

表3 直接剪切试验结果 (cq)

Table 3 Results of direct shear tests

土样名称	样本数	统计量	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$
含砂高液限黏土	18	均值/范围	32/6~55	22.9/9.1~29.7
		变异系数	0.42	0.2
含砾高液限黏土	3	均值/范围	18/15~21	26/21~26.6
		变异系数	/	/
含砂高液限粉土	18	均值/范围	27/3~64	21.1/7~28.9
		变异系数	0.6	0.24
含砾高液限粉土	6	均值/范围	28.7/10~45	23.6/18.2~26.4
		变异系数	0.58	0.17

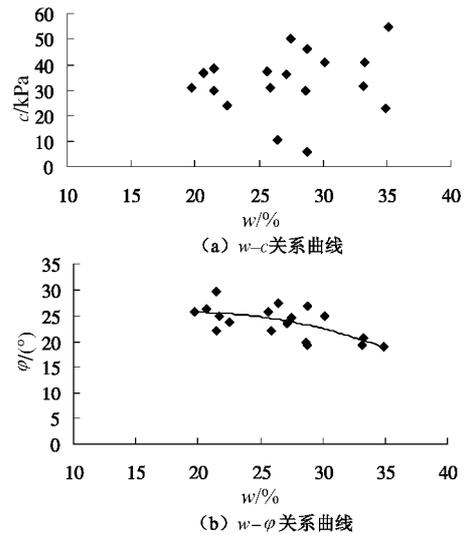


图5 初始含水率对抗剪强度指标的影响

Fig. 5 Influences of initial moisture content on shear strength indexes

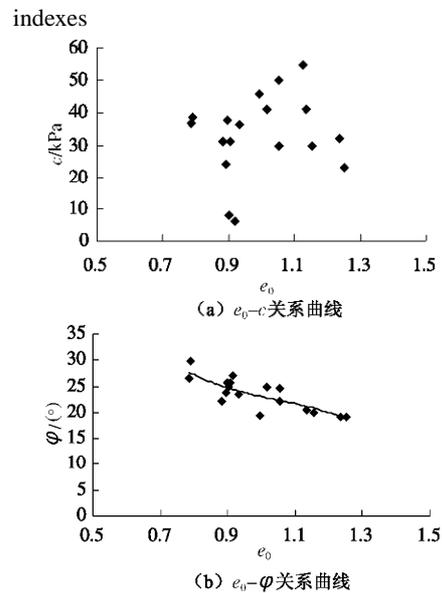


图6 初始孔隙比对抗剪强度指标的影响

Fig. 6 Influences of initial void ratio on shear strength indexes

上述结果呈现的规律为:随着天然含水率的增加, 内摩擦角呈降低趋势, 达到某一值 ( $w=25\%$ ) 后降低幅度加大; 随着孔隙比的增加, 内摩擦角呈显著降低趋势; 粗粒含量小于  $35\%$  时内摩擦角随粗粒含量的变化不明显, 大于  $35\%$  后随着粗粒含量的增加呈提高趋势, 另外, 结合图3(a)、4(a)的统计规律, 可认为粗粒含量对土体摩擦强度的影响同时受天然含水率的控制; 黏聚力变化杂乱, 除了样本本身的变异性较大外, 还说明黏聚力的变化受多因素影响, 单因素分析较难找到相应的规律。

所以, 高液限花岗岩残积土虽然具有较高的抗剪强度, 但是强度指标不仅沿着深度和平面分布离散性大, 而且受土体天然状态影响明显, 因而给实际工程的合理取值带来困难。

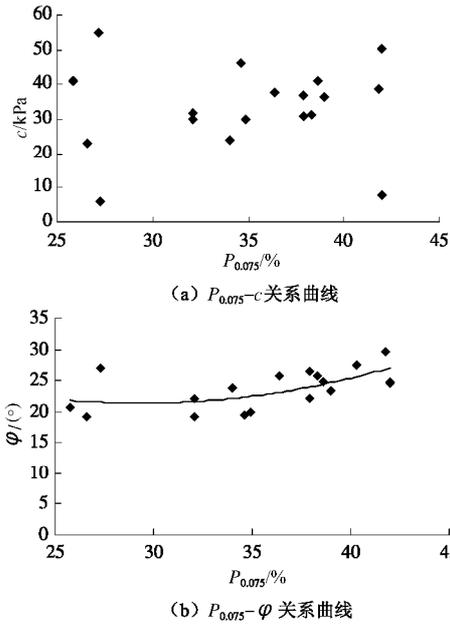


图 7 粗粒含量对抗剪强度指标的影响

Fig. 7 Influences of coarse-grained content on shear strength indexes

3.2 正交试验结果及分析

根据上述统计规律及土体天然状态对抗剪强度的影响, 本文针对含砂高液限黏土设计了初始含水率和天然密度的双因素直接剪切强度正交试验, 试验土样的粉粒组(0.075~0.005 mm)和黏粒组(<0.005 mm)含量分别为 28.3%和 25.4%, 基本物理力学指标如表 4。正交试验土样制备采用扰动土击实方式, 图 8~10 为直接剪切试验结果。

表 4 试验土样的指标

Table 4 Indexes for soil samples

w /%	$\rho$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$e_0$	$w_L$ /%	$w_p$ /%	$w_{op}$	$\rho_{dmax}$	$a_{v1-2}$ / $\text{MPa}^{-1}$
29.9	1.8	0.927	63	28.3	21.6	1.61	0.674

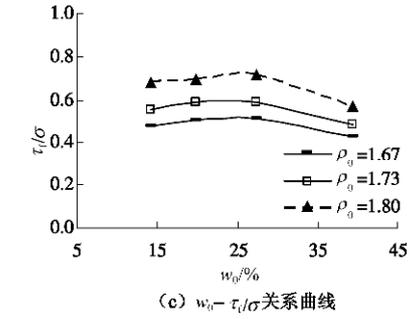
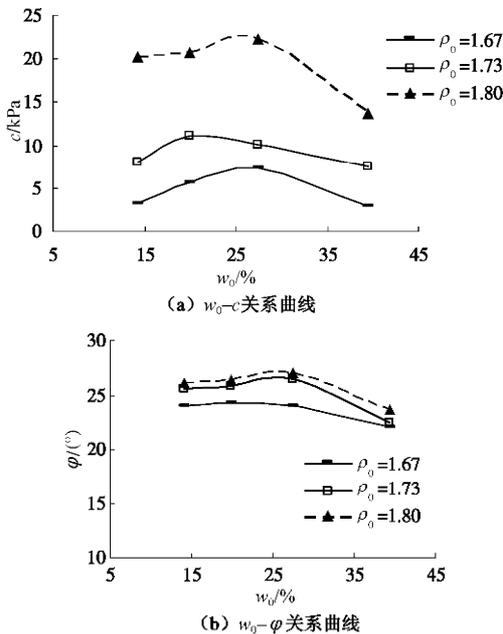


图 8 初始含水率对抗剪强度指标的影响

Fig. 8 Influences of initial moisture content on shear strength indexes

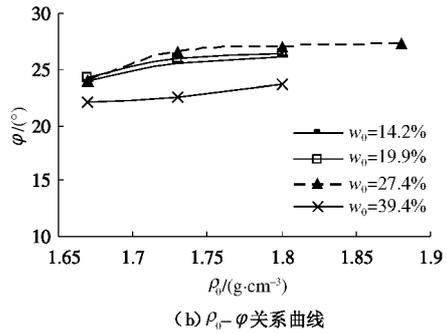
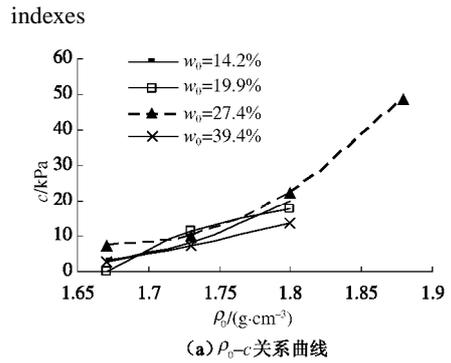


图 9 初始密度对抗剪强度指标的影响

Fig. 9 Influences of initial density on shear strength indexes

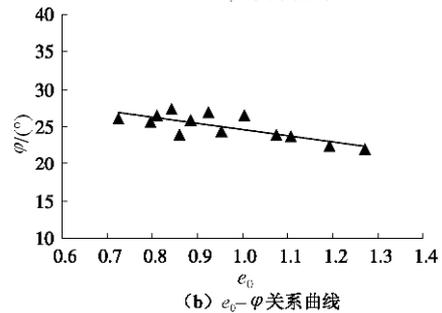
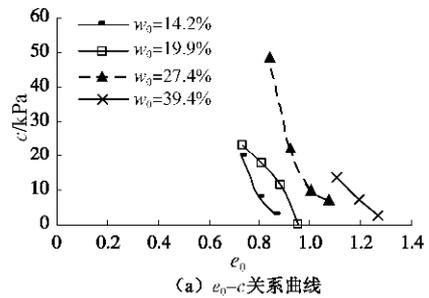


图 10 初始孔隙比对抗剪强度指标的影响

Fig. 10 Influences of initial void ratio on shear strength indexes

试验结果表明:

(1) 当击实密度相同时,黏聚力和内摩擦角随着初始含水率的增加总体呈下降趋势,但并不是单调下降,而是呈现峰值点现象。当初始含水率小于这一峰值点时,随着含水率增加  $c$  值明显增加、 $\varphi$  值基本保持不变;当含水率大于这一峰值点时, $c$  值和  $\varphi$  值都呈现明显降低趋势。所以,初始含水率对抗剪强度的影响存在一个最佳含水率,对应这一含水率时土体有较高的抗剪强度,天然密度较高时这一现象更明显。

(2) 当含水率相同时,击实密度对于抗剪强度指标的提高具有明显作用,特别是对黏聚力,但随着土中含水率的增加,这种作用会明显降低。

(3) 初始孔隙比对抗剪强度的影响对于内摩擦角和黏聚力有所不同,前者随着孔隙比增加呈单调下降趋势,后者虽然呈更加明显的下降特征,但下降规律与初始含水率有关。

所以,土体的初始状态对抗剪强度确有显著影响,且影响机理比较复杂。其中含水率对强度的影响不仅与结合水膜有关,还与土体基质吸力和内部应力有关,当初始含水率较小时土体的强度主要由结合水膜和内部应力控制,此时随着初始含水率的增加峰值强度增大,当含水率超过某一限值时,基质吸力减小和结合水膜的减薄会造成抗剪强度随着含水率的增加而降低。这一结果表明,对于实际坡体来说,不仅含水率高的土体不利于边坡稳定、非常干燥的土体也同样不利。另外,含水率对抗剪强度的影响同时还受控于土体的天然密度和初始孔隙比,土体的天然状态对抗剪强度的影响因子依次为含水率、密度和孔隙比。

## 4 土的残余强度

土体的残余强度对土质边坡的长期稳定性具有重要影响,但目前有关残余强度的研究特别是室内试验研究大多是针对细粒土,对于含粗粒细粒土的研究较少,在试验方法上也具有较大的难度<sup>[18]</sup>。

### 4.1 重塑土样制备

由于土的残余强度与应力历史无关,所以残余强度试验可以采用重塑土样。为获得质量较好的试样,采用了下述离心试验机试样制备方法:①将原状土样过筛剔除粗大颗粒;②根据原状土样的含水率和密度让水土充分湿润,然后在离心模型箱中击实;③将装有达到目标含水率和控制密度的土样的离心模型箱置于土工离心机中运行,直至达到实际土样所处的自重应力场环境;④切取所需土样,进行物理指标和物理状态指标试验,并与原状土试验结果比较是否满足控制指标。这种重塑土制备过程不仅满足了一般粗粒土需要控制的含水率及密度,同时离心机的运行可近似模拟土层的固结作用,对于细粒土来说这是十分必要的。

残余强度试验方法采用目前我国试验标准中规定的反复直接剪切试验,考虑到该类土的渗透系数较大( $k=1.3 \times 10^{-5}$  cm/s),往复剪切时适当提高了剪切速度。

### 4.2 试验结果及分析

图 11 为反复剪切试验结果,各次剪切所获得的强度指标见表 5。

表 5 反复剪切试验结果

剪切次数	1	2	3	4	5	6
$c$ /kPa	3.28	3.0	2.3	2.4	0.9	0.0
$\varphi$ (°)	28.7	27.8	27.1	25.5	24.4	24.6

图 11 试验结果表明土体的剪应力-剪应变关系呈硬化现象,随着剪切次数的增加剪切强度有一定衰减但并不出现应变软化,土体强度降至稳定值需要较大的剪切位移。固结压力对剪切性状影响较大,当固结压力较大时,随着剪切位移的发展土体的剪应力发挥过程增长,衰减幅度也较小。所以,对于高液限花岗岩残积土来说,其剪切规律和残余强度与一般黏性土有较大不同,土中较高的粗粒含量使得产生残余强度所需的剪切位移较大。鉴于实际工程中滑带土大剪切位移发生的可能性,稳定计算中强度的取值应介于峰值强度和残余强度之间,不宜直接取残余强度。

另外,剪切试验过程表明,将一般黏性土的残余

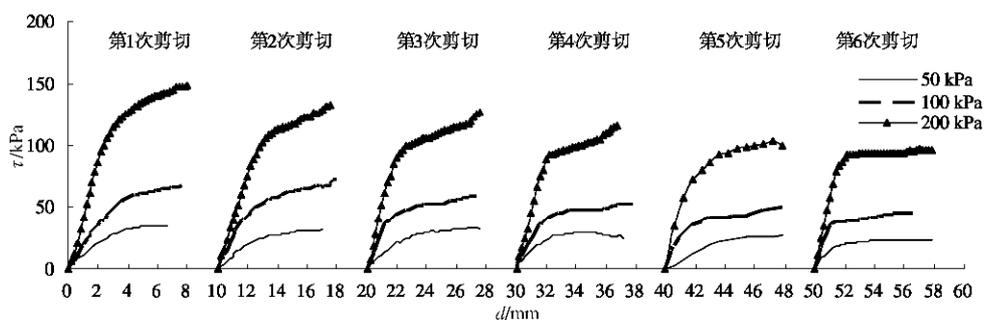


图 11 反复剪切试验的剪应力-剪切位移关系

Fig. 11 Relationship between resistance and shear displacement from repeated shear tests

强度试验方法应用于此类土存在较明显缺陷, 体现在剪切偏心较大时上盒有翘起现象, 由此形成的上下盒缝隙会造成颗粒被挤出(黏性土试验时颗粒被挤出现象不明显), 对实验产生一系列影响, 如顺着缝隙土中水流出、颗粒在上下盒接触面中的撑垫使得往复剪切面出现异面现象等, 而且固结压力越大, 这种试验影响越大, 出现强度越剪越高的现象, 直接影响对土体强度的判断。表6为试验中测得的土样在试验前、固结完成后的含水率与剪切后剪切面上的含水率对比: 固结压力较小、颗粒无挤出(或较少)时剪切面会产生颗粒的定向排列和水富集, 导致剪切面含水率增高明显, 土体产生软化; 固结压力增大后剪切面含水率由于上下盒缝隙明显出水而降低, 此时含水率的变化与试验的缺陷有很大关系。

表6 土样剪切面含水率变化

Table 6 Variation of moisture content at shear surface

试验前土样 w/%	固结压力 /kPa	固结后土样 w/%	剪切后剪切 面 w/%
29.9	50	27	33.1
	100	25	29.0
	200	20	24.0

所以, 对于这种粗粒含量较高的细粒土, 残余强度的试验难度也较大, 常规反复剪切试验方法只在固结压力较小时才是比较适用的, 固结压力较大时难以获得可靠的试验结果, 需对试验条件进行适当改善, 如开缝预剪和剪切退回时针对上盒翘起进行适当固定等, 关于这方面的详细研究笔者将另文介绍。

## 5 结 论

高液限花岗岩残积土成因复杂、性质多变, 本文针对其中含粗粒细粒土的物理特性和剪切特性进行了试验研究和有关统计分析, 得出以下几点结论。

(1) 此类土多为中—细粒花岗岩风化而成的混合土, 中间粒径(0.5~0.075 mm)较少, 微观结构疏松, 黏性与膨胀性都不明显, 水稳定性较差。

(2) 直接采用天然含水率计算土体的液性指数一般会偏小, 得出的物理状态描述与实际不符。引入细粒含水率具有合理性, 可以考虑  $d > 0.5$  mm 粗粒含量的影响, 但这一影响又与土中细粒类型有关, 如对于黏性土, 其影响存在极小值, 而对于粉土, 则随着  $P_{0.5}$  的增加呈现单调下降规律。另外, 吸着含水率  $w_A$  的取值应斟酌, 一般在 5%~20% 之间。

(3)  $d > 0.075$  mm 粗粒含量对天然含水率的影响呈“低大高小”的趋势, 即当粗粒含量在 25%~38% 之间时随着粗粒含量的增加天然含水率降低比较明显、当粗粒含量继续增加后其影响渐弱。

(4) 土体的抗剪强度与天然含水率、粗粒含量、

初始孔隙比等描述天然状态的指标有关。其中内摩擦角随着初始含水率增加呈降低趋势, 达到 25% 后降低幅度加大; 随着孔隙比的增加呈显著降低趋势; 随着粗粒含量增加呈提高趋势, >35% 时增幅略明显。黏聚力的变化受多因素影响, 单因素分析较难找到相应的规律。

(5) 土体初始含水率对抗剪强度的影响存在一个最佳含水率, 对应这一最佳含水率时土体有较大的黏聚力和较大的内摩擦角。随着初始密度的提高土体抗剪强度提高, 特别是黏聚力, 但当初始含水率增加时提高幅度降低。另外, 初始孔隙比对内摩擦角呈单调下降影响, 对黏聚力也呈下降影响, 但影响规律与初始含水率有关。

(6) 土体的剪切性状呈应变硬化规律, 随着剪切位移增加强度出现衰减, 但需经较大的剪切位移才可达到残余强度。进行边坡稳定分析时强度取值应介于峰值强度和残余强度之间, 不宜直接采用残余强度。另外, 针对一般黏性土制定的残余强度剪切试验方法应用于此类土时应对试验设备进行适当改进(见另文), 以避免粗颗粒被挤出, 提高试验结果的可靠性。

致 谢: 参加试验工作的还有吴起星、李林燕、吕晶、尹赛华等, 在此一并表示感谢!

## 参考文献:

- [1] 林宗元. 试论红土的工程分类[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 83 - 96. (LIN Zong-yuan. Discuss the engineering classification of the red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(1): 83 - 96. (in Chinese))
- [2] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特征与微观结构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 458 - 462. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 458 - 462. (in Chinese))
- [3] 左 权, 王 清, 唐大雄. 华南湘赣粤地区红土层残积红土的工程地质研究[J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(1): 70 - 76. (ZUO Quan, WANG Qing, TANG Da-xiong. Engineering geology of residual red soil form red beds in Hunan Jiangxi and Guangdong Province[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1994, 24(1): 70 - 76. (in Chinese))
- [4] 刘明俊, 靡崇蓉, 王明星. 深圳花岗岩残积土的物理力学特征[J]. 工程勘察, 1985(4): 38 - 42. (LIU Ming-jun, MI Chong-rong, WANG Ming-xing. Physical and mechanical

- characteristics of Shenzhen granite residual soil[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 1985(4): 38 - 42. (in Chinese))
- [5] 赵建军, 王思敬, 尚彦军, 等. 全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2005, **26**(4): 624 - 628. (ZHAO Jian-jun, WANG Si-jing, SHANG Yan-jun, et al. Control factors on shear strength of completely decomposed granite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(4): 624 - 628. (in Chinese))
- [6] 栾茂田, 罗锦添, 李焯芬, 等. 不排水条件下全风化花岗岩残积土工程特性与本构模型[J]. *大连理工大学学报*, 2000, **40**(增刊 1): 83 - 90. (LUAN Mao-tian, LAW K-T, LEE C-F, et al. Fundamental behavior and constitutive modeling of a CDG residual soil under undrained shear[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, **40**(S1): 83 - 90. (in Chinese))
- [7] 高国瑞. 中国红土的微结构和工程性质[J]. *岩土工程学报*, 1985, **7**(5): 10 - 21. (GAO Guo-rui. The microstructures and engineering properties of red soil in China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, **7**(5): 10 - 21. (in Chinese))
- [8] 李思平. 崩解形成的岩土特性及其防治对策的研究[J]. *水土保持学报*, 1992, **6**(3): 29 - 35. (LI Si-ping. A study on characteristic of rock-soil and countermeasures of the collapse mound formation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, **6**(3): 29 - 35. (in Chinese))
- [9] SUDHAKAR M, RAOA K, REVANASIDDAPPA. Role of microfabric in matrix suction of residual soils[J]. *Engineering Geology*, 2005, **80**: 60 - 70.
- [10] VIVNA A, CARVALHO J, FERREIRA C, et al. Characterization of a profile of residuai soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, **24**: 1307 - 1348.
- [11] 吴立坚, 钟发林, 吴昌兴, 等. 高液限土的路用特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, **25**(2): 193 - 195. (WU Li-jian, ZHONG Fa-lin, WU Chang-xing, et al. Study on road made by high liquid limit soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(2): 193 - 195. (in Chinese))
- [12] 曾静, 邓志斌, 兰霞, 等. 竹城公路高液限土与红黏土路用性能的试验研究[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(1): 89 - 92. (ZENG Jing, DENG Zhi-bin, LAN Xia, et al. Experimental study on properties of high liquid limit soil and red clay of Zhucheng Highway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(1): 89 - 92. (in Chinese))
- [13] 王清, 唐大雄, 张庆云, 等. 中国东部花岗岩残积土物质成分和结构特征的研究[J]. *长春地质学院学报*, 1991, **21**(1): 73 - 81. (WANG Qing, TANG Da-xiong, ZHANG Qing-yun, et al. A study on the structure and composition of granite residual soil in the eastern China[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1991, **21**(1): 73 - 81. (in Chinese))
- [14] GB 50021—94 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (GB 50021—94 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995. (in Chinese))
- [15] DBJ 15—31—2003 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. 6. (Guangdong Provincial Standards. DBJ 15—31—2003 Design code for building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. 6. (in Chinese))
- [16] 郑丽君. 花岗岩残积土颗粒吸着含水率对液性指数影响[J]. *山西建筑*, 2006, **32**(14): 106 - 108. (ZHENG Li-jun. The influence of the moisture content of granite mutilated territorial particle on fluid nature index[J]. *Shanxi architecture*, 2006, **32**(14): 106 - 108. (in Chinese))
- [17] 谢邦优, 陈志伟. 准确测定花岗岩残积土中细粒含水率的探讨[J]. *土工基础*, 2005, **19**(4): 73 - 75. (XIE Bang-you, CHEN Zhi-wei. How to obtain the relative-reliable water content of the fine grain granite residual soils[J]. *Soil Eng and Foundation*, 2005, **19**(4): 73 - 75. (in Chinese))
- [18] 陈晓平. 基于滑带土强度特性的水库蓄水诱发滑坡研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2010, **30**(3): 77 - 83. (CHEN xiao-ping. Overview on landslide during reservoir water impounding based on shear strength property of slip zone soil[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, **30**(3): 77 - 83. (in Chinese))