

陈佳雨,刘之葵.含水率及干密度对桂林红黏土抗剪强度的影响[J].中国岩溶,2019,38(6):930-936.  
DOI:10.11932/karst20190609

# 含水率及干密度对桂林红黏土抗剪强度的影响

陈佳雨<sup>1,2</sup>,刘之葵<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;  
2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为研究含水率及干密度对桂林红黏土抗剪强度的影响机理,进行了一系列控制含水率、干密度的直剪试验,建立含水率及干密度与抗剪强度的函数关系式。试验结果表明:同一干密度条件下,粘聚力、内摩擦角随含水率的增大整体呈下降趋势;在含水率相同时,随干密度增大,粘聚力减小,内摩擦角增大。分析表明:随含水率增大,具有“水稳定”性的胶结作用减弱,引起粘聚力降低;土中结晶态氧化铁含量高于胶结态时,内摩擦角增大,反之则降低。干密度增大时,重塑土因胶结键断裂后短时间无法恢复,使土颗粒的有效胶结面积的减少程度大于其增多的程度,引起粘聚力下降;干密度的增大会改变红黏土的微观结构模型,土中封闭孔隙的增多会导致粘聚力下降;土样微观结构性随干密度的增大而增强,使内摩擦角增大。

**关键词:**桂林;红黏土;抗剪强度;含水率;干密度

中图分类号:TU446 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2019)06-0930-07 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

桂林红黏土主要是一种由更新世残积、坡残积、冲洪积及洪积坡组成,并经后期湿热化作用改造的富含铁铝氧化物的黏性土<sup>[1]</sup>,主要分布在云贵高原、四川东部、两湖两广大部分地区和江西、江苏等部分地区。红黏土的抗剪强度特性是评价地基承载力、稳定性的重要指标,也是边坡稳定及支挡结构设计计算的重要参数,因此,研究红黏土的强度特性具有重要的工程意义<sup>[2]</sup>。

国内外众多学者已对红黏土抗剪强度变化规律及影响因素进行了大量研究。研究表明,红黏土具有独特的结构和成分<sup>[3-4]</sup>。受地域性的影响,各地区

红黏土的工程力学特性存在差异<sup>[5-9]</sup>。游离氧化物的胶结作用对红黏土粘聚力影响较大,对内摩擦角无太大影响<sup>[10]</sup>。土颗粒间胶结物质的差异是引起高液限土和红黏土水敏感性不同的主要原因<sup>[11]</sup>。还有研究认为红黏土重塑前后物理力学性质会发生显著改变,主要受土样矿物赋存状态的变化和微观结构变化的影响<sup>[12]</sup>。

影响红黏土抗剪强度因素颇多,目前关于红黏土抗剪强度影响因素的研究主要集中外在因素(含水率或干密度)的研究,且大多研究仅采用一种土样进行试验,其研究成果代表性不强。鉴于红黏土地域性明显,关于含水率及干密度对不同地域红黏土强度特性的影响机理分析还存在差异,因此本文针

基金项目:国家自然科学基金项目(41867039);广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198238),广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目

第一作者简介:陈佳雨(1995-),硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 444074132@qq.com。

通信作者:刘之葵(1968-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土工程专业的教学与科研工作。E-mail: liuzhikui@126.com。

收稿日期:2018-07-30

对典型的桂林红黏土,选取 8 种不同初始环境下的红黏土进行直剪试验,探讨含水率及干密度对桂林红黏土强度的影响机理,并建立二者与抗剪强度指标的函数关系式,为桂林地区红黏土的理论研究及相关工程问题提供参考。

## 1 抗剪强度

### 1.1 试验材料

试验用红黏土取自桂林市七星区某大学留学生公寓场地,共取 8 个土样,其物理性质见表 1。

表 1 桂林红黏土的物理力学性质

土样编号	含水率/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	孔隙比	饱和度/%	比重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
1#	34.70	1.76	1.31	0.93	92	2.74
2#	34.10	1.87	1.40	0.93	95	2.76
3#	34.30	1.90	1.42	0.94	100	2.75
4#	35.30	1.84	1.36	0.98	98	2.76
5#	30.30	1.86	1.42	0.90	98	2.77
6#	35.20	1.86	1.38	0.95	97	2.75
7#	29.70	1.87	1.44	0.96	98	2.76
8#	32.5	1.93	1.46	0.96	97	2.75

### 1.2 试验过程

#### 1.2.1 不同含水率条件下试样制备

将各土样充分碾碎,过 2 mm 标准筛,放入 100~110 °C 烘箱中烘干后,8 个土样含水率均按照  $\omega=18\%$ 、22%、25%、28%、31%、35% 这 6 种情况进行试验。各种含水率情况下,土样根据其初始干密度称取 4 个环刀样所需干土质量备用,计算出不同含水率情况下所需的水质量,加水使土样吸湿,均匀搅拌后装入保鲜袋中封存,静置 24 h,待水分迁移至平衡,称取适量土分层装入压样器中,采用千斤顶进行压样。

#### 1.2.2 不同干密度条件下试样制备

各土样均以初始干密度为标准,取  $0.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  为减小刻度进行 3 种情况设计,如 8# 土样干密度设置为  $1.46\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.36\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.26\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,计算并称取 8 个土样在各干密度下干土的质量,再根据各土样初始含水率称取所需水质量,然后均匀洒入土中,充分搅

匀后装入保鲜袋密封,静置 24 h 后再压制土样,各土样每种干密度情况下需压制 4 个土样。

#### 1.2.3 试验仪器

本实验采用的是 ZJ 型应变控制式四联直剪仪。每组试样制备完毕后,将试样放入直剪盒进行不排水剪切试验,分别施加 100、200、300、400 kPa 垂直压应力,剪切速率均采用  $0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

## 2 不同含水率下试验结果及分析

### 2.1 不同含水率对抗剪强度的影响

根据试验结果绘制不同含水率条件下,抗剪强度指标的变化规律图(图 1、图 2)。

#### 2.1.1 不同含水率与粘聚力的关系

由图 1 可看出,8 种不同红黏土粘聚力随含水率变化整体呈下降趋势。在含水率为 18%~22% 范围内,各土样粘聚力均随着含水率的升高而降低,且下降幅度较明显,最大下降值为 108.48 kPa。当含水率持续增大至 28% 时,粘聚力值持续减小,但减小幅度有所减缓;当含水率为 28%~31% 范围内时,8 种土样粘聚力随含水率的增大而增大,且增长幅度较一致,且含水率为 31%± 时,该 8 种土样粘聚力出现了小“峰值”;在含水率为 31%~35% 范围内,各土样粘聚力均随着含水率的升高而降低,呈现出较好的同步性。

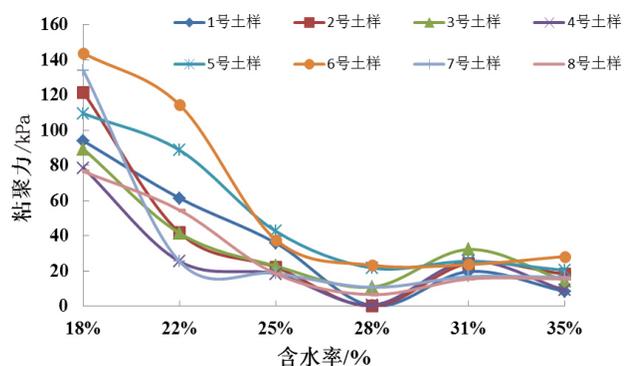


图 1 红黏土粘聚力随含水率变化关系曲线

Fig. 1 Curve of cohesion of red clay varying with water content

#### 2.1.2 不同含水率与内摩擦角的关系

由图 2 可知,当含水率从 18% 提高至 22% 时,8 种土样的内摩擦角均随着含水率的增大而减小,减小幅度明显。随后,含水率增大至 22%~28% 范围内

时,8种土样内摩擦角均随着含水率的增大呈先增大后减小的趋势。当含水率从28%提升至31%时,各土样内摩擦角随着含水率的增大而减小,且下降幅度较明显;随着含水率的进一步增大,各土样内摩擦角随之增大,变化规律较一致。

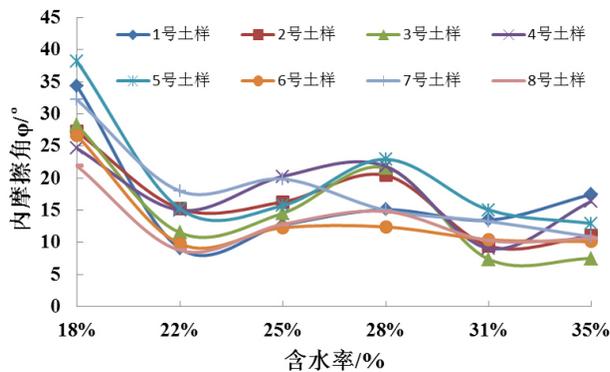


图2 红黏土内摩擦角随含水率变化关系曲线

Fig. 2 Curve of friction angle changing with water content of red clay

## 2.2 不同含水率条件下试验结果及机理分析

针对上述试验中不同含水率条件下红黏土剪位移-剪应力、粘聚力和内摩擦角出现的变化规律,将从以下几个方面进行分析:

(1)基于图1的试验数据,运用Matlab软件中最小二乘法进行数据拟合,得出红黏土粘聚力与含水率关系可近似表示为(以2#土样为例):

$$c = -121\ 824\omega^3 + 106\ 571\omega^2 - 30\ 721\omega + 2\ 931.7 \quad (1)$$

其相关系数  $R^2 = 0.9872$ 。

粘聚力主要来源于土粒间的相互吸引、水膜连结及胶结作用,且以胶结连结和水膜连结为主<sup>[13]</sup>。从图1可看出,红黏土粘聚力减小具有明显的分段性。当含水率在18%~28%范围内下降最为明显。在接近含水率28%时,土体接近饱和状态,此时粘聚力趋于稳定,变化幅度较小。此试验结果与文献<sup>[6]</sup>中西南山岭重丘区的粘聚力随含水率的变化类似。产生这一现象的主要原因一方面是由于红黏土的高强度主要是游离氧化物形成的胶结造成的,且这种连结是水稳定的<sup>[14]</sup>。因此在低含水率范围内,红黏土中游离氧化铁与黏土矿物相互吸附,形成胶结连结强度,但当含水率持续增大超过某一临界值时,此胶结联结将发生破坏,致使粘聚力急剧下降。另一方面,随着含水率的增大,土颗粒表面弱结合水膜增厚,颗粒间距增大,导致粒间水膜连结减弱,从而粘聚力

下降。

(2)基于图2的试验数据,运用Matlab软件中最小二乘法进行数据拟合,得出红黏土内摩擦角与含水率关系可近似表示为(以2#土样为例):

$$\varphi = 660\ 345\omega^4 - 734\ 438\omega^3 + 303\ 089\omega^2 - 54\ 947\omega + 3\ 701.5 \quad (2)$$

其相关系数  $R^2 = 0.9999$ 。

从试验结果来看,红黏土的内摩擦角随着含水率的增大呈先减小后增大再减小后增大的变化特征,总体呈下降趋势。影响红黏土内摩擦角的因素主要是:颗粒结构、大小、密实度<sup>[15]</sup>。红黏土中游离氧化铁以结晶态和胶结态两种形式赋存,二者含量的相对变化可解释分析含水率对摩擦强度的机理<sup>[2]</sup>。当含水率较低时,红黏土土粒在具有胶结作用的氧化物连结下形成稳定的团粒结构,红黏土氧化铁主要以胶结态的形式存在。此时土颗粒间的公共结合水膜较薄,水膜连结力较大,且红黏土土体细小颗粒居多。在胶结作用力和水膜连结力作用下,各土粒接触面增多,架空孔隙被细小颗粒填充,形成牢固的团聚结构,土体密实且整体性强,故内摩擦角较大。随着含水率的增大,具有“水稳”特性的胶结作用力及水膜连结力都有所减小,土体团聚结构随之减弱。因此内摩擦角在低含水率范围内整体较大,且随着含水率的增大而减小。但当含水率在一定范围时(22%~28%),红黏土中结晶态的游离氧化铁含量增多,加强了颗粒表面粗糙度,红黏土颗粒间的咬合作用力加强,因此内摩擦角呈现出小幅度增长趋势;当含水率逐步增大时,土团粒间的表面结合水膜厚度增厚,导致水膜作用力减弱,咬合作用力也随之减弱,因此内摩擦角减小。

## 3 不同干密度下试验结果及分析

### 3.1 不同干密度对抗剪强度的影响

绘制不同干密度条件下,红黏土抗剪强度指标变化趋势图(图3)。图中水平1、水平2、水平3分别表示各土样的低、中、高三个不同干密度条件。

#### 3.1.1 不同干密度与粘聚力的关系

由图3可知,8种红黏土土样粘聚力值随干密度增大整体呈下降趋势,且减小幅度逐渐较大。随着干密度的增大,1#土样的粘聚力值减小呈现出较好的线性关系。

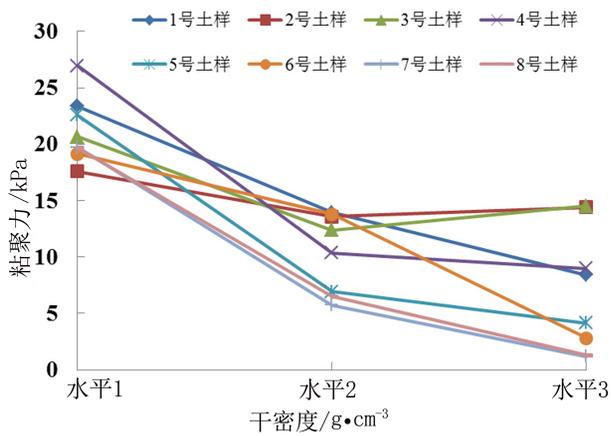


图3 红黏土粘聚力随干密度变化关系曲线

Fig. 3 Curve of cohesion of red clay varying with dry density

1#土样其粘聚力值  $c$  与干密度  $\rho_d$  的关系为:

$$c = -74.75\rho_d + 105.68$$

2#、3#两种土样粘聚力值变化规律较一致,前期随着干密度的增大,粘聚力值出现大幅度降低,最大下降率达66.53%,而后随着干密度进一步增大,两种土样粘聚力呈现出小幅度增长趋势。

3#土样其粘聚力值  $c$  与干密度  $\rho_d$  的关系为:

$$c = 517.5\rho_d^2 - 1397\rho_d + 954.68$$

4#、5#、6#、7#、8#五种土样粘聚力值前期随着干密度的增大出现大幅度降低,随着干密度进一步增大,4#、5#、7#、8#四种土样粘聚力持续下降,且下降幅度变缓,且6#土样粘聚力下降幅度更显著。

### 3.1.2 不同干密度与内摩擦角的关系

由图4可知,8种红黏土土样内摩擦角值随干密度增大整体呈增长趋势,各土样内摩擦角最值均出现在干密度最值处。1#、4#、6#三种土样内摩擦角值变化规律较一致,即随着干密度的增大同步增长,呈现出较好的线性关系。

1#土样其内摩擦角值  $\varphi$  与干密度  $\rho_d$  的关系为:

$$\varphi = 68.8\rho_d - 73.501$$

4#土样其内摩擦角值  $\varphi$  与干密度  $\rho_d$  的关系为:

$$\varphi = 76.4\rho_d - 87.071$$

6#土样其内摩擦角值  $\varphi$  与干密度  $\rho_d$  的关系为:

$$\varphi = 72.75\rho_d - 82.45$$

5#、7#、8#三种土样内摩擦角值在干密度值较小时,随着干密度的增大出现大幅度增长,而后随着干密度进一步增大,内摩擦角增长趋势明显减缓。2#、3#土样的内摩擦角值变化较小,整体呈缓慢增大趋势。

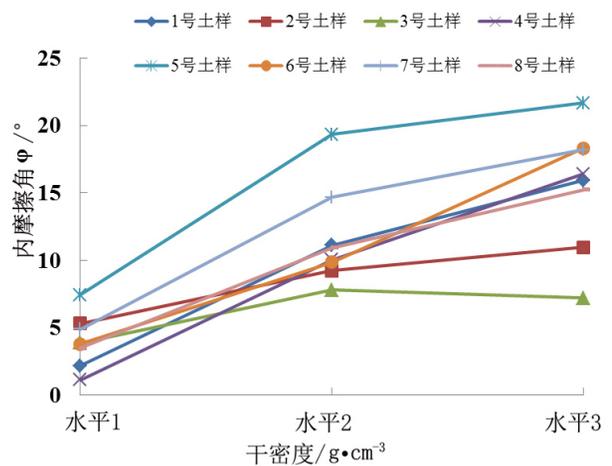


图4 红黏土内摩擦角随干密度变化关系曲线

Fig. 4 Curve of friction angle changing with dry density of red clay

### 3.2 不同干密度条件下试验结果及机理分析

针对上述试验中相同含水率条件下,不同干密度红黏土粘聚力和内摩擦角出现的变化规律,将从以下几个方面进行分析:

(1)基于图3的试验数据,运用 Matlab 软件中最小二乘法进行数据拟合,得出红黏土粘聚力与干密度关系可近似表示为(以2#土样为例):

$$c = 433\rho_d^2 - 1122.5\rho_d + 741.05 \quad (3)$$

其相关系数  $R^2=1$ 。

黏性土的粘聚力主要来源于分子间的范德华力、胶结力和水膜连结力,其中以胶结力最为主要。桂林红黏土的主要矿物成分为:高岭石、三水铝石、针铁矿及一定量的石英<sup>[16]</sup>,且已有学者证明针铁矿与高岭土的界面上因形成胶结键——氢键,而发生胶结,当正应力为零时,作用于剪切面上的胶结键强度,即胶结强度,就是粘聚力。图5为红黏土中胶结键变化示意图。由图可知重塑过程中破坏了土体的原有结构,土中的大部分胶结键发生断裂,该过程短时间内不可恢复,因此重塑土中胶结作用较弱。干密度增大后,土颗粒易被压碎形成细小颗粒,导致单个颗粒之间的有效胶结面积减少(图6),但颗粒含量的增多使得颗粒间的胶结点增多,又增大了有效胶结面积,当有效胶结面积减少程度大于其增多的程度时,会引起胶结作用力减小,宏观表现为粘聚力下降。

干密度的增大也会在水膜连结力及范德华力产生影响。水膜连结力的大小与颗粒间的间距有关;范德华力的大小取决于颗粒间有效接触面积的大

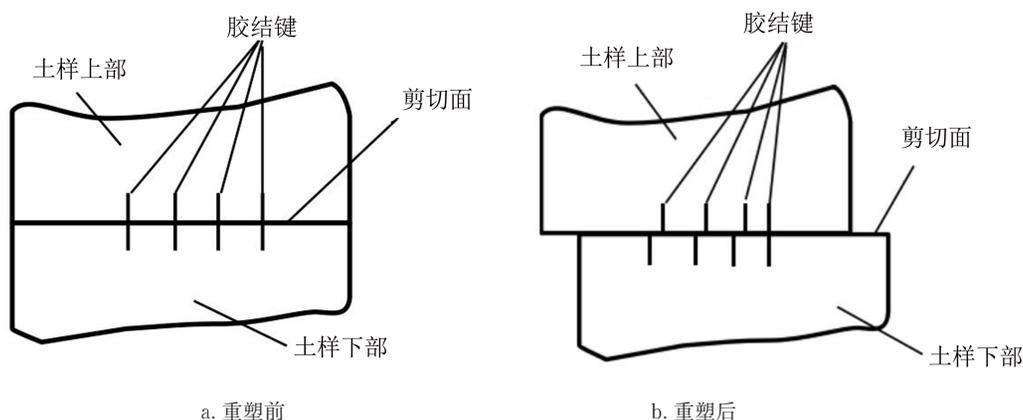


图5 红黏土胶结键断裂示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bond break of red clay

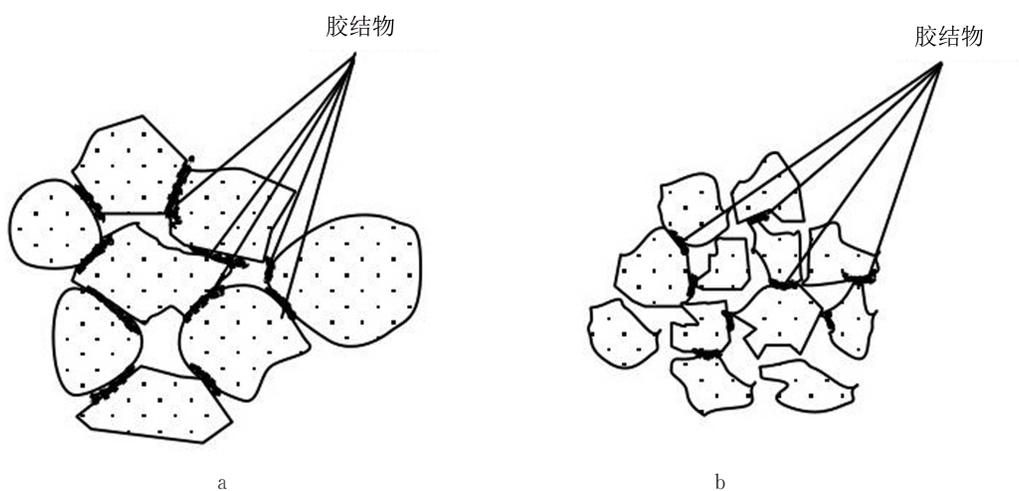


图6 随干密度增大红黏土中胶结变化示意图

Fig. 6 Sketch of variation of cementation in red clay with increase of dry density

小。针对前文不同干密度条件下红黏土粘聚力的试验结果,可对红黏土的微观结构模型做如图7的假设:图7为含水率一定时,在低、中、高水平干密度条件下红黏土微观结构图。从图7a可知:含水率较大,干密度较小时,黏性土中孔隙间距较大且孔隙间相互连通形成通道孔隙及死端孔隙,这两种孔隙中的水分子流通性较强,剪切过程中易被挤出,使粒间结合水膜变薄,宏观表现为粘聚力相对较大。但随着干密度的增大,土颗粒含量增多,含水率较高时,红黏土在重塑过程中因为其粘着性较大而促使土团粒接触形成含大量封闭大孔隙及少量死端孔隙分布的孔隙骨架(图7b),使得孔隙水不连续,流通性变差,从而剪切时封闭孔隙水不易排出,结合水膜厚度未变薄,故粘聚力降低。干密度继续增大后,土中仅有

封闭孔隙分布,结合水膜仍然不能发生改变,但因许多封闭大孔隙逐渐被细小颗粒填充,使颗粒间的有效接触面积增大(图7c),达到增强土颗粒间范德华力的效果,可小幅度提高粘聚力,从而粘聚力下降幅度有所减缓。

(2)基于图4的试验数据,运用Matlab软件中最小二乘法进行数据拟合,得出红黏土内摩擦角与干密度关系可近似表示为(以2#土样为例):

$$\varphi = -108\rho_d^2 + 309.1\rho_d - 210.08 \quad (4)$$

其相关系数 $R^2=1$ 。

土的内摩擦角与土的密实度、颗粒结构及大小密切相关。由上述红黏土微观结构模型可看出:低密实度时,土中孔隙较大,粒间接触不紧凑,宏观表现为内摩擦较小。干密度增大后,土颗粒含量增多,

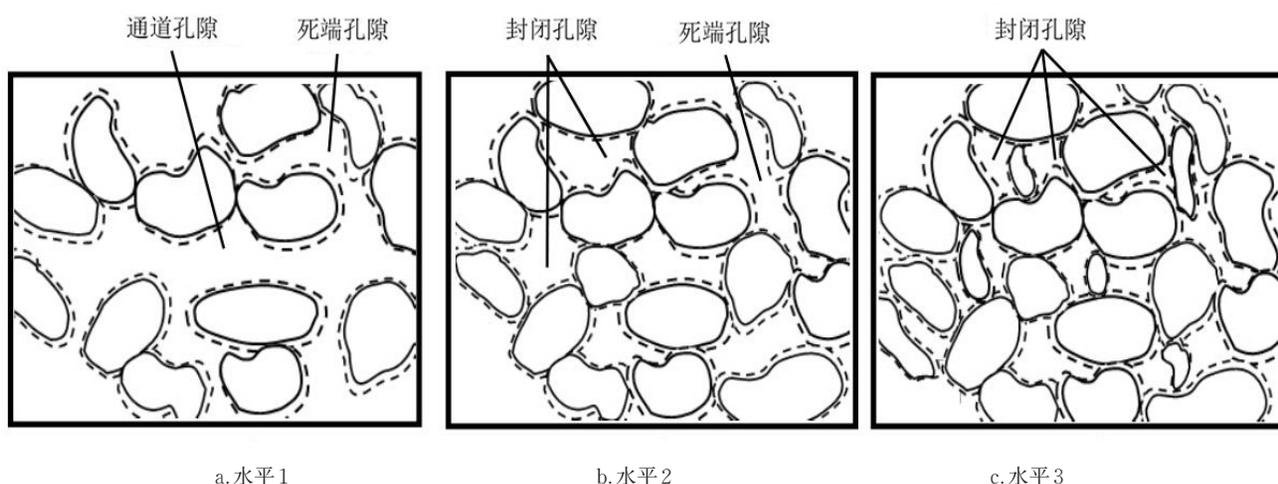


图 7 高含水率时不同干密度条件下红黏土微观结构模型

Fig. 7 Microstructure model of red clay under different dry density conditions at high water content

在颗粒间的相互挤压下土体形成新的孔隙结构,同时部分大孔隙会被细小颗粒填充,土粒之间的有效接触面积增大,土体密实度增大,因此土粒之间的表面粗糙度也就越大,表现为内摩擦角增大;随着干密度继续增大,越来越多的细小颗粒填充于大孔隙中,单个孔隙的尺寸逐渐减小,土颗粒间联结越紧密,团聚结构加强,使得颗粒间咬合度增强,从而内摩擦角继续增大。

## 4 结 论

(1) 同一干密度条件下,随含水率增大,红黏土的粘聚力、内摩擦角整体呈下降趋势,且在低含水率范围内(小于22%),下降幅度更为明显;而当土体接近饱和状态时,红黏土的粘聚力值趋于稳定,变化幅度较小。较粘聚力相比,含水率变化对红黏土内摩擦角影响较小。主要机理是:以游离氧化铁为主的胶结连结的“水稳定”性是造成红黏土粘聚力变化的主要原因;胶结物以结晶态和胶结态两种形式赋存的相对含量造成内摩擦角发生变化。

(2) 相同含水率情况下,随干密度增大红黏土的粘聚力整体呈减小趋势,内摩擦角持续增大。重塑红黏土胶结键断裂后,胶结力减弱且短时间无法恢复,干密度的增大导致土颗粒的有效胶结面积减少程度大于其增多的程度,导致粘聚力下降。从微观角度分析认为:干密度的增大会改变红黏土的微观结构模型,土中孔隙结构的变化会引起粘聚力发生改变,封闭孔隙的增多及通道孔隙的减少使得粘聚

力下降。内摩擦角变化取决于土样微观结构性的改变;干密度增大后,孔隙体积减小,土样的结构性增强,从而内摩擦角增大。

## 参考文献

- [1] 顾展飞,刘琦,卢耀如,等.酸碱及可溶盐溶液对桂林红黏土压缩性影响实验研究[J].中国岩溶,2014,33(1):37-43.
- [2] 张添锋,孙德安,刘文捷.桂林压实红黏土抗剪强度与含水率关系[J].上海大学学报(自然科学版),2014,20(5):586-595.
- [3] 李景阳,朱立军,梁风,等.碳酸盐岩残积红黏土微观结构的扫描电镜研究[J].中国岩溶,2002,21(4):233-312.
- [4] 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):726-731,835.
- [5] 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.
- [6] 李辉,刘顺青.重塑红黏土和粉状煤系土的水敏感性比较研究[J].山大学学报(自然科学版),2015,54(6):90-93.
- [7] 杨松,卢廷浩.非饱和红黏土的不排气、不排水三轴剪切试验研究[J].岩土力学,2011,32(增1):356-359.
- [8] 胡艳欣.红黏土含水量和干密度与抗剪强度的相关性分析[J].人民长江,2017,48(增1):249-252.
- [9] 赵蕊,左双英,王嵩,等.不同含水量贵阳重塑红黏土三轴抗剪强度试验研究[J].水文地质工程地质,2015(5):90-95.
- [10] 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.
- [11] 刘顺青,洪宝宁,方庆军,等.高液限土和红黏土的水敏感性研究[J].深圳大学学报理工版,2013,30(1):78-83.
- [12] 李龙起,罗书学,姜红,等.非饱和红黏土土水特性及强度特征研究[J].西南交通大学学报,2014,49(3):393-398.
- [13] 杨庆,贺洁,栾茂田,等.非饱和红黏土和膨胀土抗剪强度的比较研究[J].岩土力学,2003,24(1):13-16.

- [14] 王继庄. 游离氧化铁对红黏土工程特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 147-156.
- [15] 傅鑫晖, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 非饱和红黏土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2): 204-209.
- [16] 吕海波, 曾召田, 尹国强, 等. 广西红黏土矿物成分分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 651-656.

## Effect of moisture content and dry density on shear strength of Guilin red clay

CHEN Jiayu<sup>1,2</sup>, LIU Zhikui<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Guangxi Geotechnical and Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** This work studied the influence mechanism of water content and dry density on the shear strength of Guilin red clay. A series of direct shear tests to control water content and dry density were carried out and the relationship between water content and dry density and shear strength was established. The results show that under the same dry density condition, the cohesion and internal friction angles decrease with the increase of water content. When the water content is the same, the cohesion decreases with the dry density, while the internal friction angle increases. The analysis shows that with the increase of water content, the cementation with "water stability" is weakened, causing the cohesive force to decline; when the crystalline iron oxide content in the soil is higher than the cemented state, the internal friction angle increases, and vice versa. When the dry density becomes larger, the remolded soil cannot be recovered after breaking due to the cement bond, so that the effective cementation area of the soil particles is reduced more than the degree of increase, causing the cohesion to decrease. The growth of the dry density can change the microstructure model of the red clay, where the increase of closed pores of the soil leads to a decrease of cohesive force. The microstructure of the soil sample increases with the increasing dry density, resulting in an increase of the internal friction angle.

**Key words** Guilin, red clay, shear strength, moisture content, dry density

(编辑 张玲)