

非饱和红黏土的强度特性研究

傅鑫晖^{1,2}, 韦昌富^{1,4}, 颜荣涛¹, 张芹¹, 赖友华³

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 福建省建筑设计研究院, 福州 350001; 3. 中建海峡建设发展有限公司, 福州 350003; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 红黏土是一种富含胶结作用物质的塑性黏土, 与普通黏性土相比, 红黏土的强度特性更为复杂。通过直剪仪对不同含水率和不同含丙三醇溶液的重塑红黏土进行了抗剪强度试验, 发现红黏土的强度、黏聚力随着溶液含量的增加出现了“双峰”值现象, 且内摩擦角基本保持不变, 用丙三醇溶液替代水溶液配制的土样其强度有了明显的降低。结合核磁共振仪对红黏土试样的孔径分布研究情况, 基于 Bishop 提出非饱和土的有效应力原理, 探讨了非饱和红黏土的强度随含水率变化出现“双峰”现象的影响机制, 认为红黏土本身孔径大小分布特征起了非常重要的作用。

关 键 词: 红黏土; 抗剪强度; 非饱和度

中图分类号: TU 441+.2

文献标识码: A

Research on strength characteristics of unsaturated red clay

FU Xin-hui^{1,2}, WEI Chang-fu^{1,4}, YAN Rong-tao¹, ZHANG Qin¹, LAI You-hua³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research, Fuzhou 350001, China; 3. CSCEC Strait Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China.)

Abstract: Red clay is one of the special soils which contains cementing material. Compared with common cohesive soils, the strength characteristics of red clay are more complicated. Some direct shear tests are performed on the unsaturated red clay samples with water and propanetriol solution; and the experimental results show that the strength and cohesion of samples exhibit double peaks of strength increasing with the increase of solution content; while the internal friction angle does not change. Besides, the strength of samples diminishes obviously with the propanetriol solution instead of water. Based on Bishop's effective stress for unsaturated soil and the characteristic of pore distribution acquired by NMR tests, the impact mechanism of pore distribution characteristic on strength is discussed, and a conclusion is drawn that pore distribution characteristic has much effect on strength of red clay samples.

Key words: red clay ; shear strength; unsaturation

1 引 言

红黏土在我国中西部地区分布广泛, 尤其在桂林地区, 红黏土约占整个第四系分布面积的75%, 为桂林市主要建筑活动区^[1], 作为一种受地形条件控制、工程力学性质特殊的结构性黏土, 其物质成分、结构特征及工程力学特性受到了广泛的关注。国内外众多学者对红黏土的物质成分、结构特征和工程力学特性作了大量研究, 孔令伟、谭罗荣等^[2-4]曾先后对广西、贵州等地的红黏土进行了研究, 探

讨了红黏土的土颗粒之间的胶结作用、红黏土的微观结构特征及微观结构模型。王洋等^[5]通过试验分析了在含水率变化模式、水化学作用模式、干湿交替作用模式和渗流作用模式下红黏土力学性质的变异性。肖智政等^[6]研究了残积红黏土的固结特性及原状土和重塑土在不同围压下的破坏形式的变化。欧孝夺等^[7]探讨了红黏土抗剪强度与温度之间的相关关系。杨荫华, 柏树田^[8]研究了红黏土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响。刘晓红、杨果林、余敦猛等^[9-10]对红黏土在循环荷载作用下的压实性

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 广西自然科学基金重大项目 (No.2011 GXNSFE018004); 广西自然科学基金创新团队项目 (No.2012GXNSFGA060001); 广西自然科学基金重大项目 (No.2012GXNSFEA053002)。

第一作者简介: 傅鑫晖, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要从事红粘土方面的研究工作。E-mail: fxhh@vip.qq.com

和湿化变形特性进行了试验研究。谈云志、孔令伟等^[11-12]对红黏土在循环荷载作用下的压实性和湿化变形特性进行了试验研究，沈珠江、蒋明镜、李建红等人^[13-14]对黏性土微观结构剪切变形特性进行试验研究。

尽管已有许多学者对红黏土做了大量的研究，但还有不少问题尚未从根本上解决，如：红黏土孔隙率大，含水率高，但是其承载力也很高；红黏土微观物质结构特征与宏观工程力学效应之间的关系；化学效应对红黏土力学特性的影响。

本文针对红黏土研究中的不足，对非饱和红黏土的强度特性进行研究。由于非饱和红黏土的有效应力原理与抗剪强度理论的研究需要从颗粒间的吸力特征方面进行探索，而粒间吸力由结构吸力^[15]和基质吸力决定。程昌炳^[16-17]等的研究证实了红黏土中游离氧化铁的胶结作用对结构强度的形成具有实质性的意义，在试验中，为了排除胶结作用对红黏土黏聚力产生的影响，采用了丙三醇作为溶剂，以减少游离氧化铁胶体的产生，从而排除结构吸力对黏聚力的影响，同时，我们从红黏土土样的孔隙结构分布入手，进一步分析基质吸力对黏聚力的贡献。

2 试验过程

2.1 土样的基本物理性质测试

土样采用的是桂林雁山地区的红黏土，其基本物理性质见表 1 所列。颗分曲线如图 1。其中，粒径在 0.25~0.075 mm 占 1.615%，粒径在 0.005~0.075 mm 之间的占 20.883%，小于 0.005 mm 的占 77.502%。

表 1 红黏土物理性质指标
Table 1 Physical properties of red clay

性状	液限	塑限	塑性指数	土粒相对密度	初始含水率 /%	最优含水率 /%
红黏土	64	46	18	2.73	29.6	30

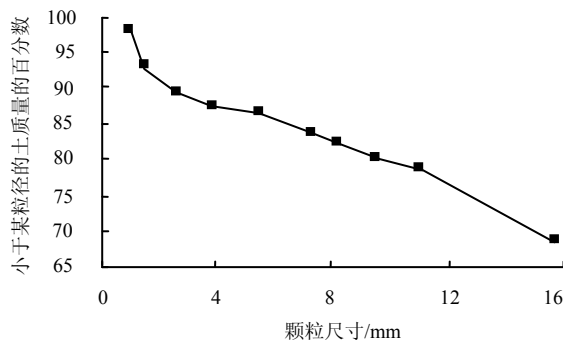


图1 土样颗粒分布图

Fig.1 The grading curve of red clay

2.2 直剪试验过程

2.2.1 自然含水率试样的制备与剪切

试样采用环刀压实方法来制备，环刀样的横截面积为30 cm²，高度为2 cm。试样的风干含水率为2.2%，压实后要求干密度为1.15 g/cm³。首先，加水使土样吸湿，拌匀配制含水率为12.3%，15%，20%，23.8%，28.4%，30.1%，35.8%，49.7%的土样，静置48 h后土样中的水分迁移达到平衡，再次测量土样的含水率，得出准确值。然后，根据要求的密度，称取所需土质量，将试样分3层装入环刀，各层土料质量基本相等，每一层压实后，将表面刨毛，然后再加第2层土料，如此到最后一层，控制各组试样的密度差值不大于0.02 g/cm³。然后放入直剪仪中进行不排水剪切试验，剪切速率为0.8 mm/s。

2.2.2 含丙三醇试样的制备与剪切

用纯度为99%的丙三醇替代水作为溶剂，配制含丙三醇为14.1%，14.56%，16.5%，17%，18.8%，19.9%，21%，22%，25.5%，28.8%，32.1%的土样，由于纯净的丙三醇具有很强的吸水性并且其沸点为290°，所以在配制过程中将土样置于保鲜袋中，加入适量的丙三醇溶剂之后立即将袋口封紧，然后拌匀，静置96 h后，用酒精燃烧法测量土样中丙三醇的含量，然后根据配制自然含水率试样的要求制成干密度为1.15 g/cm³的环刀样。为了减少丙三醇溶液吸收空气中的水分从而导致的试验数据失准，在环刀样制成之后，迅速将试样放入直剪仪中进行不排水剪切，剪切速率为0.8 mm/s。

2.3 试验结果分析

2.3.1 红黏土的抗剪强度变化规律

抗剪强度的变化如图2~4所示，(1)从图2中可以发现：当土样中的含水率从12.3%提高到15.2%的时候，土体抗剪强度也随之提高，但是当含水率继续提高之后土体强度有所下降，当含水率为18.9%到26.7%时，强度随着含水率的增加而增长，随后，土体强度则随着含水率的增加而降低。(2)用丙三醇溶液替代水溶液配制土样，然后进行直剪试验，从图3中不难发现，土样的强度变化规律较为类似。(3)为了能使试验结果更加直观，我们从试验结果中选取了正应力为400 kPa状态下红黏土抗剪强度值，绘制了抗剪强度随溶液含量变化的曲线(见图6)。从图4中我们发现，当溶剂换成丙三醇后，红黏土的强度发生了较为明显的下降，但是变化趋势非常的一致，强度也出现了“双峰”现象。

针对这一现象，同时考虑到：由于丙三醇的表面张力为(20℃) 63.4 mN/m，水的表面张力为

(20℃) 72.75 mN/m, 结合公式(2~3)可以发现, 由于表面张力的差异, 这也在一定程度上造成了用丙三醇配制的土样的强度低于用水配制的土样的强度这一现象。但是, 由于二者表面张力差值不大, 故引起强度变化的主要原因很可能是由于水溶液和红黏土试样充分作用后生成了游离氧化铁胶体, 使得土样的结构吸力大幅度的提高, 从而提高了土体的抗剪强度。

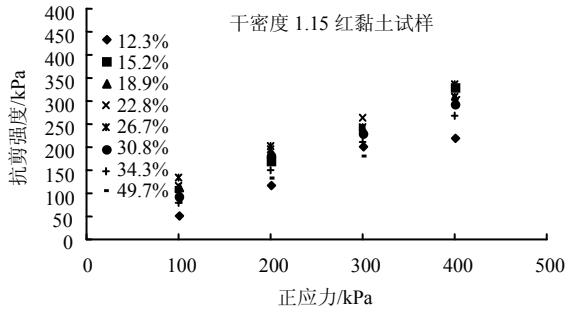


图2 不同含水率对应的抗剪强度线
Fig.2 Shear strength test results of red clay soil with different moisture contents

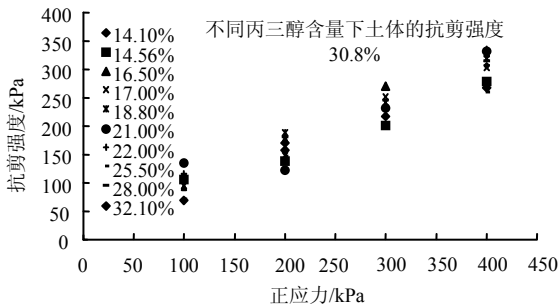


图3 不同丙三醇含量对应的抗剪强度
Fig.3 Shear strength with different propanetriol contents

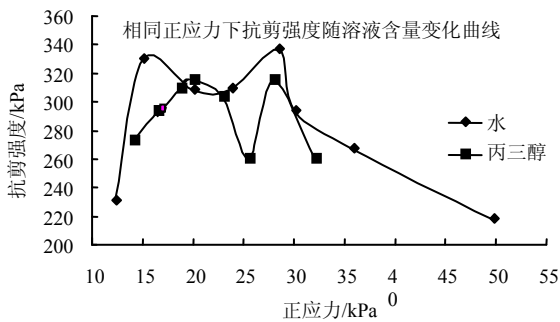


图4 相同正应力下抗剪强度随溶液含量变化的曲线
Fig.4 Curves of shear strength with different solution contents in the same normal stress

2.3.2 红黏土内摩擦角的变化规律及影响因素分析

根据试验结果绘制丙三醇溶液以及水溶液含量的变化与内摩擦角的关系曲线, 如图5所示, 由图可知, 在含水率为12%~35%的区段内, 内摩擦角的

变化幅度不大, 在32°左右波动。红黏土由于游离氧化铁的胶结作用形成了一定的团粒结构, 团粒结构间的结合状态也可能对内摩擦角的变化产生一定的影响, 为了排除这种影响, 用丙三醇替代水作为溶剂配制相同干密度的红黏土样, 进行了直剪试验, 从图中可以发现: 内摩擦角的变化幅度依然不大, 同样也在32°左右波动。进而我们可以认为, 在一般情况下, 影响红黏土内摩擦角的因素主要是: 颗粒结构、大小、密实度。红黏土团粒间的结合状态对内摩擦角的变化并没有明显的影响。

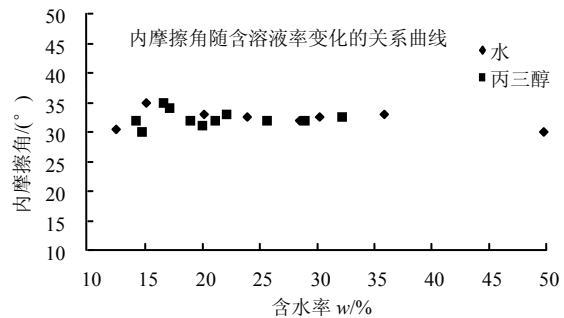


图5 不同溶液中内摩擦角与含溶液量之间的关系
Fig.5 The relationship between internal friction angle and solution content with different solutions

2.3.3 红黏土黏聚力的变化规律及影响因素分析

根据前人对红黏土的研究结果我们可以了解到: 非饱和红黏土的黏聚力主要由结构吸力即红黏土中的胶结力和基质吸力构成。在试验中, 为了探究基质吸力对红黏土黏聚力产生的影响, 我们采用了丙三醇作为溶剂, 以减少游离氧化铁胶体的产生, 从而减少胶结作用对黏聚力的影响。

根据试验结果, 绘制出溶液含量的变化与黏聚力的关系曲线, 如图6所示。

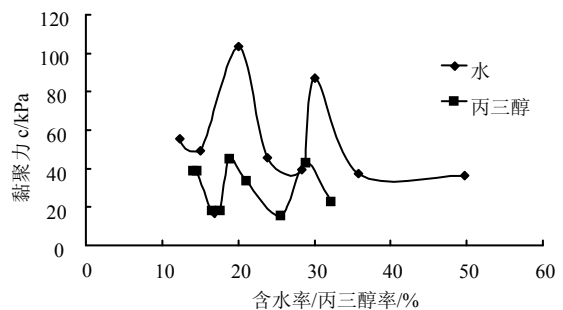


图6 不同溶液中黏聚力与溶液含量之间的关系
Fig.6 The relationship between cohesion and solution content with different solutions

由图6可知, 用水配制的红黏土土样的黏聚力要大于丙三醇溶液配制的土样, 参照谭罗荣, 孔令伟等^[20]学者提出的红黏土胶结作用的模型——游

离氧化铁颗粒极易与水作用形成一种溶胶胶体，这种絮凝结构可能受到某种化学力作用凝集成一定大小的颗粒状单元，或称聚集体，这种基本颗粒单元有较高的结构联结强度。基本颗粒单元通过胶结物质黏聚成较大粒团，而大小不等的粒团再通过胶结物质聚集构成更大的粒团。土体即由大小各异的粒团颗粒单元、聚集体、胶结物质堆积而成。

当红黏土中有水分进入时，水分首先会和土中游离氧化铁颗粒形成溶胶胶体，而后填充在黏土矿物颗粒形成的絮凝结构孔隙中，在某种化学力作用下形成单元体，随着水分的增多红黏土依次形成较大的粒团以及更大的粒团结构。这些胶结结构对红黏土黏聚力产生了很大的影响。当使用丙三醇溶液配制红黏土试样时，笔者发现溶液含量相同的土样中，用丙三醇配制的土样形成的团粒结构体积远小于用水配制的试样，且团粒的体积大小较为均一。根据试验结果，我们可以认为胶结物质大量减少，所以结构强度下降，因此黏聚力较水溶液试样有了明显下降。然而，用2种不同溶剂配制的相同干密度的红黏土试样，其黏聚力随含溶液率的变化均出现了较为明显的“双峰”现象，这一现象可能与红黏土特殊的微观结构有关。

4 试验结果的讨论

根据库仑定律： $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ ，我们可以得出黏聚力与内摩擦角是影响土体强度的两个重要的因素，由于试验中，红黏土的内摩擦角的变化不大，因此强度的变化受 c 值的变化影响，都出现了明显的“双峰”现象，针对这一现象，我们进行了如下分析与讨论：

首先，结合上述试验结果，我们认为，胶结作用虽然并未对抗剪强度的“双峰值”产生直接的影响，但是，胶结作用使红黏土形成了较为特殊的微观结构，这种结构很可能是红黏土产生抗剪强度“双峰”现象的间接原因。为了探讨强度与黏聚力出现这一现象的原因，我们对土样进行了核磁共振试验，得到了红黏土试样孔隙分布的情况，如图 7、8 所示，其中横坐标代表土样中孔隙的尺寸，纵坐标代表孔隙的数量。图 7 为不同干密度土样的孔隙分布；图 8 为初始含水率不同但干密度相同的土样。

从图中可以发现，红黏土的孔隙分布在两个尺寸区间内较为密集，我们从非饱和土力学的角度出发，结合 Bishop 提出的非饱和土平均有效应力定义，将参数 χ 取为饱和度即： $\sigma' = (\sigma_n - u_a) +$

$S_r(u_a - u_w) = \bar{\sigma} + S_r P_c$ ，就可以将基质吸力和饱和度同时引入抗剪强度理论中。

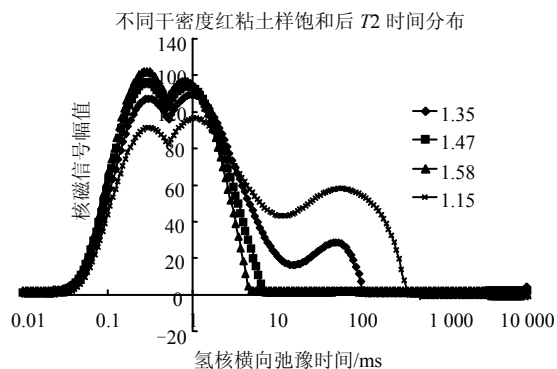


图7 不同干密度红黏土的孔隙分布
Fig.7 Pore size distributions of red clay with different dry densities

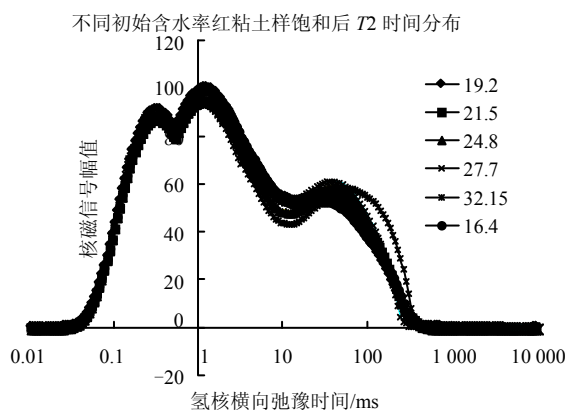


图8 不同初始含水率红黏土样的孔隙分布
Fig.8 Pore size distributions of red clay samples with different initial moisture contents

由 Bishop 有效应力得出的抗剪强度理论为：

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi = c + (\bar{\sigma} + S_r P_c) \tan \phi \quad (1)$$

该公式可重新整理为如下形式：

$$\tau_f = (c + S_r P_c \tan \phi) + \bar{\sigma} \tan \phi = c' + \bar{\sigma} \tan \phi \quad (2)$$

式中： $S_r P_c \tan \phi$ 用来表示湿吸力与可变结构吸力之和。

$$P_c = u_a - u_w = \sigma(1/r_1 + 1/r_2) = 2\sigma/\bar{r} \quad (3)$$

式中： $\bar{\sigma} = \sigma_n - u_a$ 为平均净应力； $p_c = u_a - u_w$ 为吸力； S_r 为饱和度； r_1, r_2 是水-气界面的曲率半径， \bar{r} 是平均曲率半径，按 $2/\bar{r} = 1/r_1 + 1/r_2$ 来确定。这是微观状态毛细压力现象。 σ 为界面张力，考虑到土颗粒并非为规则的圆形，引入与土颗粒相关的参数 κ ，公式 (3) 可以改写为

$$P_c = \frac{\kappa \sigma}{r} \quad (4)$$

首先，由于试验中使用 3 种不同溶液且在不同

含量之下 ϕ 的变化并不显著, 都在 32° 左右波动, 因此, 本文忽略了 ϕ 值的影响, 认为 c' 的变化仅受 $S_r P_c$ 的影响。

由于非饱和土的强度与吸力有很大关系, c' 出现“双峰值”的原因就是在其中的某两个区间存在较大吸力影响。即:

$$F_c = S_r P_c \quad (5)$$

同时假设岩土体的孔隙分布为 $\phi(r)$, 根据水优先分布于小孔隙, 可以得出:

$$S_r = \int_0^r \phi(r) dr \quad (6)$$

对 $F_c(S_r) = S_r P_c$ 求导后可得:

$$\frac{DF_c}{DS_r} = P_c + S_r \frac{DP_c}{DS_r} = P_c + S_r \frac{DP_c}{Dr} \frac{Dr}{DS_r} \quad (7)$$

把 (5) 代入 (7) 中, 可以得到:

$$\frac{DF_c}{DS_r} = \frac{\kappa\sigma}{r} - S_r \frac{\kappa\sigma}{r^2} \frac{Dr}{DS_r} \quad (8)$$

令 $\frac{DF_c}{DS_r} = \frac{\kappa\sigma}{r} - S_r \frac{\kappa\sigma}{r^2} \frac{Dr}{DS_r} = 0$, (8) 式可变为

$$\frac{DS_r}{Dr} = \frac{S_r}{r} \quad (9)$$

将 (6) 代入到 (9) 式中, 可以得到:

$$f(r) = \int_0^r \phi(r) dr - \phi(r) \cdot r \quad (10)$$

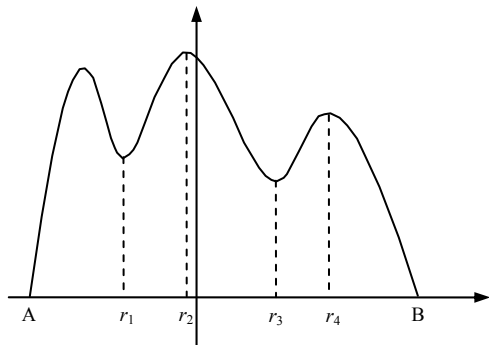


图9 初始含水率为 32% 红黏土样的孔隙分布图
Fig.9 Pore size distributions of red clay samples with 32 percent initial moisture content

从图 9 中我们不难看出, 当 r 处于 r_1 附近时, $f(r) > 0$; 在 $r_1 < r \leq r_2$ 范围内, 随着 r 的增大, 必然出现 $f(r) < 0$; 当 r 在 r_3 附近时, $f(r) > 0$, 随着 r 的继续增大, 必定会再次出现 $f(r) < 0$ 。我们假定孔隙的分布在 $[a, b]$ 上连续, 那么, 根据零点定理我们可以得出, 至少有 3 个点满足 $f(r) = 0$, 也就是说, 式 (5) 有三个极值点。由于在 r_1 和 r_3 附近函数 $f(r)$ 都出现了先增大后减小的现象, 故函数也将出现 2 个极大值点, 所以, 黏聚力 c 也很可能因此而产生

“双峰”现象。

5 结 论

(1) 红黏土的强度随含水率的变化而发生了明显的改变, 尤其在含水率为 12%~27% 之间时, c 值出现了“双峰”现象, 由于内摩擦角并未发生明显的变化, 所以强度的改变主要受 c 值变化的影响。

(2) 通过对比用 2 种不同溶液配制的红黏土试样的直剪结果可以发现: 胶结作用对红黏土内摩擦角的变化没有太大的影响, 然而却是红黏土黏聚力的重要组成部分。所以用 2 种不同溶液配制的试样内摩擦角的变化均不显著, 而黏聚力则发生了明显的变化, 且强度随含水率变化均出现“双峰”现象。

(3) 基于 Bishop 提出的非饱和土平均有效应力原理, 探讨了孔径分布特征对强度特性的影响, 认为孔径大小分布对非饱和土强度存在明显影响, 且试验中的非饱和土红黏土的强度随含水率变化出现“双峰”现象是由于红黏土本身孔径大小分布特征引起的。

参 考 文 献

- [1] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 《桂林岩溶地质》之九: 桂林环境工程地质[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [2] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 370—373. ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 370—373.
- [3] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红黏土有效胶结特征的初步研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 42—47. KONG Ling-wei, LUO Hong-xi, YUAN Jian-xin. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(5): 42—47.
- [4] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特性与微观结构模型[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.
- [5] 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, 2007, 46(1): 128—132. WANG Yang, TANG Lian-sheng, GAO Quan-chen, 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.
- [6] 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(6): 990—993.
XIAO Zhi-zheng, LIU Bao-chen. Experimental study on mechanical strength of residual laterite[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(6): 990—993.
- [7] 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 Xiao-duo, WU Heng, ZHOU Dong. Comparative study on thermodynamics characteristics of red clay and expansive soils in Guangxi[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(7): 1068~1072.
- [8] 杨荫华, 柏树田. 红土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 104—113.
YANG Yin-hua, BAI Shu-tian. The influence of irreversibility of desiccation of lateritic soils on their physico-mechanical properties[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(4): 104—113.
- [9] 刘晓红, 杨果林, 方薇. 红黏土临界动应力与高铁无碴轨道路基床换填厚度[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 348—353.
LIU Xiao-hong, YANG Guo-lin, FANG Wei. Critical dynamic stress of red clay and replacement thickness of ballastless track cutting bed of high-speed railways[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 348—353.
- [10] 余敦猛, 杨果林, 方薇. 武广客专红黏土变形特性及形成机理研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(6): 1255—1259.
YU Dun-meng, YANG Guo-lin, FANG Wei. Study on deformation characteristics and formation mechanism of red clay along wuhan-guangzhou passenger line[J]. **Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering)**, 2010, 34(6): 1255—1259.
- [11] 谈云志. 非饱和红黏土三轴试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(5): 1255—1259.
TAN Yun-zhi. Study on the triaxial tests of unsaturated lateritic soil[J]. **Journal of Hefei University of Technology**, 2009, 32(5): 1255—1259.
- [12] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实红黏土的湿化变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 348—353.
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental study on wetting deformation of compacted laterite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 348—353.
- [13] 李建红, 沈珠江. 结构性土的微观破损机理研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1525—1532.
LI Jian-hong, SHEN Zhu-jiang. Study on mechanism of micro-failure of structured soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 33(3): 348—353.
- [14] 蒋明镜, 彭立才, 朱合华, 等. 珠海海积软土剪切带微观结构试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2017—2023.
JIANG Ming-jing, PENG Li-cai, ZHU He-hua, et al. Microscopic investigation on shear band of marine clay in Zhuhai, China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2017—2023.
- [15] 汤连生, 王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 83—88.
TANG Lian-sheng, WANG Si-jing. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils, China[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 83—88.
- [16] 程昌炳, 康哲良, 徐昌伟. 针铁矿与高岭土胶结本质的微观研究初探[J]. 岩土力学, 1992, 13(2, 3): 122—127.
CHENG Chang-bing, KANG Zhe-liang, XU Chang-wei. Study on chemical kinetics of reaction between goethite and chlorhydric acid[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1992, 13(2, 3): 122—127.
- [17] 程昌炳, 徐昌伟, 孔令伟, 等. 天然针铁矿胶结土与盐酸反应的化学动力学及其力学特性预报. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 44—50.
CHENG Chang-bing, XU Chang-wei, KONG Ling-wei, et al. Chemical kinetics for reaction of the clay samples cemented by nature goethite with chlorhydric acid and the prediction of their mechanical properties[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(3): 44—50.
- [18] 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—149.
WANG Ji-zhuang. The effects of free iron oxides on the engineering properties of red clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 5(1): 147—149.
- [19] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程性质学[M]. 北京: 科技出版社, 2006.