

巴东组非饱和红土强度与变形特性试验研究^{*}

祝艳波 余宏明 高建伟 钱玉智

(中国地质大学工程学院 武汉 430074)

摘要 宜昌-巴东段高速公路修建中形成了大量的路堑边坡,上覆为巴东组红层残坡积红土。降雨条件下,土体强度急剧下降,导致大量路堑边坡失稳。目前针对巴东组残坡积红土强度与变形特性开展非饱和和试验的研究较少,为探索基质吸力对红土强度的影响,对红土进行了土水特征曲线、三轴强度试验,采用 GDS 三轴系统对红土进行了饱和及非饱和剪切试验,非饱和三轴试验采用了常含水量试验方法。结果表明:基质吸力对巴东红土强度影响很大。土体强度随吸力增大而呈非线性增长;而基质吸力随着含水量增大而减小,即巴东组非饱和红土强度特性随土体含水量增大而变差。最后拟合出巴东非饱和红土的经验抗剪强度公式。研究成果对该区域工程实践具有一定的参考意义。

关键词 巴东红土 基质吸力 GDS 三轴仪 三轴试验 变形 非饱和土强度

中图分类号:TU446 **文献标识码:**A

EXPERIMENTAL STUDY ON DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF BADONG UNSATURATED RED CLAY

ZHU Yanbo YU Hongming GAO Jianwei QIAN Yuzhi

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract Lots of cutting slopes were developed in building along the highway from Yichang to Badong, where the ground was covered by the residual unsaturated red clay. The soil strength fell sharply under rainfall, which caused a large number of cutting slopes to lose stability. Currently there was little experimental study in strength and deformation characteristics of Badong unsaturated red clay. To investigate the effect of matrix suction to the shear strength of red clay, the soil-water characteristic curve and triaxial strength test of the red soil were conducted. The triaxial shear test was conducted by using GDS triaxial system with double pressure chamber. The results show that the matrix suction has a major influence on soil strength. When the matrix suction is controlled, the soil strength has a nonlinear growth with the matrix suction increasing; the matrix suction gets lower as the soil water content increases. That's to say, the strength characteristics of Badong unsaturated red clay can get worse with soil water content increasing. Finally, the shear strength formula of Badong unsaturated red clay was fitted. The research results can be used for engineering practice in this region.

Key words Badong unsaturated red clay, Matrix suction, GDS triaxial system, Triaxial test, Deformation, Strength of unsaturated soil

* 收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-03.

基金项目:湖北省交通运输厅科技项目(巴东组软岩边坡变形破坏机理及处置技术研究)项目支持.

第一作者简介:祝艳波,主要从事岩土体的工程稳定性及地质灾害防治研究. Email:342948684@qq.com

通讯作者:余宏明,主要从事地质灾害分析与防治及岩土工程领域的教学与科研工作

1 引言

在建工程宜昌-巴东高速公路, 沿线形成大量路堑边坡。该地区受大气四季循环交替作用显著, 特别是在多雨炎热的夏季更为突出。从非饱和土角度看, 这些路堑边坡都处于非饱和运行状态。而许多边坡的失稳常是由于降雨使土的基质吸力丧失所造成的^[1]。

宜巴高速路穿越三叠中统巴东组(T_2b^2)紫红色泥岩地层, 上覆巴东红层残坡积红土, 其工程地质性质及变化特征对该区的工程建设有很大的影响^[2]。红土的力学性能强烈地受土体含水量变化的影响^[3]。残坡积红土大部分时间处于非饱和状态, 存在着基

质吸力, 自然工况下土体抗剪强度很高, 边坡稳定; 开挖路堑边坡后, 在强降雨或雨季条件下, 土体含水量增加, 基质吸力降低, 导致土体抗剪强度降低, 路堑边坡大量失稳, 设计被迫变更。所以从含水量亦即基质吸力的角度, 研究巴东非饱和和红土强度特性, 指导工程实践是十分迫切的、也是行之有效的。

非饱和土抗剪强度是预测路堑等边坡稳定性的首要问题^[4], 针对线路出现的不良工程地质问题, 选取线路区域典型路堑边坡的红土, 采用双压力室的 GDS 三轴试验系统进行饱和、非饱和三轴剪切试验, 得到红土抗剪强度。

2 非饱和土抗剪强度理论

非饱和土的抗剪强度理论研究有着数十年的历史, 但这些理论都离不开 Mohr-Coulomb 准则。非饱和土的强度不但与土的结构、应力路径、密度有关, 而且还与土的含水量或土的饱和度有关。应用最广泛的有以下 2 种公式^[5, 6]。

2.1 Bishop 抗剪强度公式

Bishop 提出的强度公式表达如下:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (1)$$

式中, c' 为有效凝聚力; ϕ' 为有效内摩擦角; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; $\sigma - u_a$ 为净围压; $u_a - u_w$ 为基质吸力; χ 为与饱和度有关的参数。

2.2 Fredlund 抗剪强度公式

Fredlund 提出的强度公式表达如下:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

其中, c' 、 ϕ' 、 u_a 、 u_w 的含义与公式(1)一致; ϕ^b 为内摩擦角, 且不是一个常数, 很多学者认为它与吸力大小有关。

Bishop 强度理论和 Fredlund 强度理论基本是一致的, 只是各自对吸力项有不同方式的表达, 但都被许多学者接受。基质吸力测定要消耗很长时间, 且不容易测量, 所以长期以来没有在实际工程中得到很好的应用。

3 试验研究

3.1 试验仪器设备

本次试验采用英国 GDS 仪器设备有限公司和香港科技大学联合开发的双压力室标准非饱和土三轴试验系统。设备主要由 3 部分组成(图 1): 压力室、加压系统和量测与采集系统^[7]。



图 1 GDS 三轴剪切试验系统

Fig. 1 GDS system for triaxial shear test

试样帽中的铜质多孔板控制孔隙气压力, 底座中的陶土板控制控制水压力, 当试样两端的气压力与水压力平衡时, 试样基质吸力就达到所控制的目标值^[8]。该三轴仪测试样总体变时, 是通过利双室体变测量系统来实现的^[9]。对于一个直径 61.8mm, 高 125mm 的试样, 该体变系统的精度可达 0.04%。

表1 土样的物理力学指标
Table 1 Physical indexes of soil sample

干密度 $\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重 C_s	天然含水量 $W / (\%)$	液限 $W_L / (\%)$	塑限 $W_p / (\%)$	颗粒组成/mm					矿物成分	
					<5	<2	<1	<0.5	<0.25		<0.075
1.97	2.77	16.3	23.8	18.47	87.72	62.11	47.73	29.08	21.25	9.96	伊利石、蒙脱石、高岭石

3.2 试验试样及制备

土样选自现场典型路堑边坡的残坡积红土(表1)。试验试样直径61.8mm,高125mm。由于试样尺寸限制,剔除5mm以上土颗粒制备重塑样,采用等量替代法处理原始级配曲线(图2)。

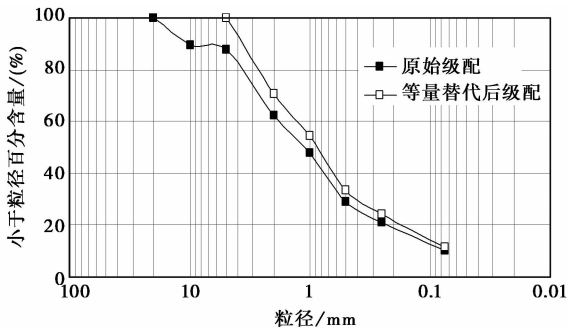


图2 非饱和红土级配曲线

Fig. 2 Grading curves for unsaturated red clay

等量替代后试验采用的试样干密度 $1.85 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验前将土样烘干并按表2中6个粒径范围筛分。制样时根据等量替代后的级配分别配制每一个试样的土料,根据含水量加一定量水,闷料24h后分5层击样进行试样制备。为缩短非饱和三轴试验中试样水汽平衡的时间,采用非饱和土样进行试验。非饱和土样的制样含水量根据土水特征曲线确定,为13.1%。

3.3 试验方案与试验过程

采用常含水量试验方法对巴东非饱和红土进行三轴剪切试验(表2)。

非饱和土三轴试验包括固结和剪切2个阶段。固结阶段:试样安装好后,试样在 σ_3 、 u_a 、 u_w 等压力下固结。固结平衡的判别标准为:24h内反压体变小于试样总体积的0.02%。固结平衡平均用时一周。剪切阶段:控制孔隙空气在排水条件下,孔隙水在不排水条件下进行剪切,孔隙气压力维持在固结过程中所承受的压力,孔隙水压力由传感器量测^[6]。三轴试验采用的剪切速率为0.002

表2 常含水量三轴试验方案

Table 2 Scheme of CW triaxial test

编号	固结过程			剪切过程				剪切速率/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
	σ_3 / kPa	u_a / kPa	u_w / kPa	σ_3 / kPa	u_a / kPa	u_w / kPa	$(\sigma_3 - u_a) / \text{kPa}$	
1	150			150			50	
2	200	100	50	200	100	量测	100	0.002
3	300			300			200	

$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,最大剪切应变为16%。

4 试验成果分析与讨论

4.1 土水特征曲线

为了确定非饱和土三轴试验制样初始含水量,进行土水特征曲线试验。制备干密度为 $1.85 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,直径61.8mm,高20mm的环刀样,饱和后采Soim-oisture 5Bar压力板仪进行脱水试验,得到土水特征曲线(图3)。可以看出基质吸力随着含水量的增大而减小。

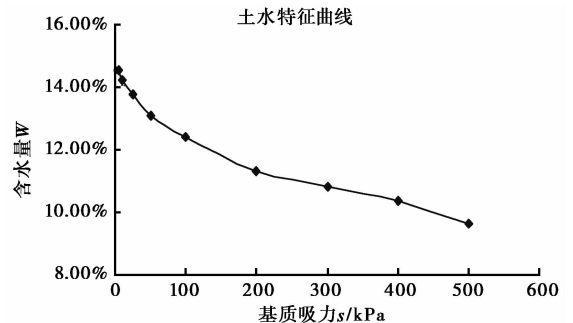


图3 巴东红土土-水特征曲线

Fig. 3 Soil-water characteristic curve of Badong red clay

4.2 饱和土三轴抗剪强度

试样制备过程与常含水量非饱和三轴试验一致。采用CD固结排水试验,试样施加的围压分别为50kPa、100kPa、200kPa,剪切速率为0.008 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。试验完成后,绘制一系列摩尔圆,画出包

络线,得到饱和土抗剪强度指标, $c' = 5.6\text{kPa}$, $\phi' = 28^\circ$ (图4)。

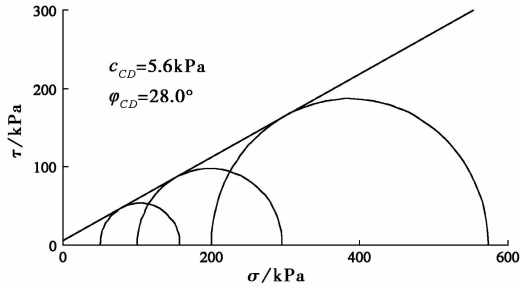


图4 饱和和粘土 CD 三轴试验结果

Fig. 4 Results of CD triaxial test for saturated red clay

4.3 非饱和土三轴抗剪强度

4.3.1 应力应变关系

同一剪切过程包含了土的强度与变形 2 个方面,反应了土体在受力过程中的力学性状^[10]。常含水量三轴试验得到的应力应变曲线呈现应变硬化特性(图5)。对于初始基质吸力都为 50kPa 的 3 个试样而言,最大主应力随净围压($\sigma_3 - u_a$)的增加而增加,净围压越大,破坏时的偏应力越大,说明土体的强度有所提高。

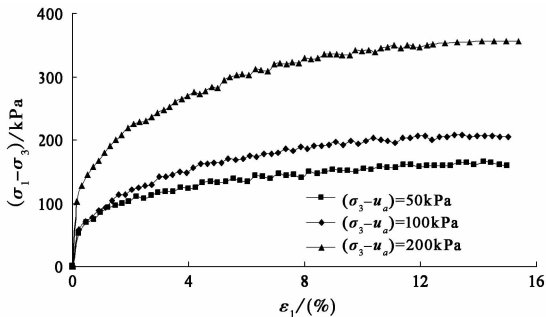


图5 非饱和土三轴试验应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of triaxial test for unsaturated soil

4.3.2 吸力变化规律

图6为剪切阶段的基质吸力随轴向应变的变化曲线,当在应变小于3%的剪切初期,吸力随着轴向应变增加而快速减少,这是因为在剪切过程中孔隙气压力不变而孔隙水压力快速增加,超孔隙水压力未来得及消散而引起的,尤其在 $(\sigma_3 - u_a) = 200\text{kPa}$ 条件时,高净围压及轴压使试样在剪切过程中产生更高的孔隙水压力,导致气压与水压差值出现负值;当应变大于3%时,超孔隙水压慢慢消散,孔隙水压力增幅逐渐减小,最终趋于稳定,吸力也趋于稳定,高净围压下气压与水压差也归为正值。试样的基质吸力随着净围压的增大而减小,黄志全^[11]研究成果

也得到了这一规律。而高净围压下,基质吸力先减小后增大,与低净围压条件下的规律有所不同。因为高净围压的压缩作用使得试样的水汽联通状态发生改变,导致在剪切过程中,孔隙水压力的相应规律有所改变^[12]。

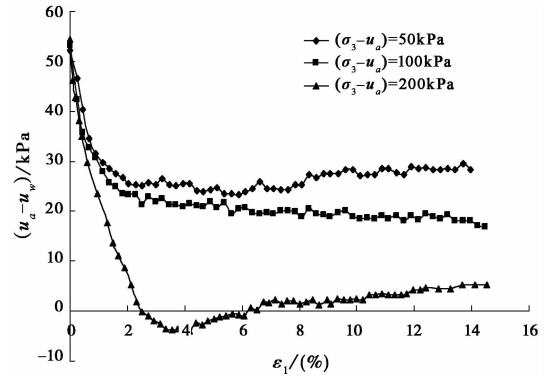


图6 非饱和三轴试验基质吸力与应变关系曲线

Fig. 6 Suction-strain curves of triaxial test for unsaturated soil

4.2.3 体变变化规律

图7为剪切过程中土体积变化与应变关系曲线,可以看出在最大主应力出现之前,净围压越大,体变也越大。土样体积均发生剪缩。剪切过程孔隙气的外排而使孔隙体积减小,但含水量保持不变,试样的饱和度有所增加。

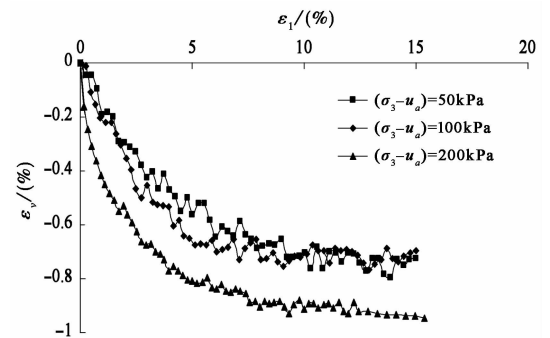


图7 非饱和三轴试验土体变与应变关系曲线

Fig. 7 Volume change-strain curves of triaxial test for unsaturated soil

4.2.4 强度包络线及强度指标

4.2.4.1 ϕ^b 值的确定

Ho 和 Fredlund 研究发现,基质吸力对土体强度的影响,主要通过强度指标 ϕ^b 反映出来, ϕ^b 如图8所示来确定^[6]。假定 3 个土样的有效凝聚力 c' 和有效内摩擦角 ϕ' 都相同^[13],为饱和土强度指标 $c' = 5.6\text{kPa}$, $\phi' = 28^\circ$ 。非饱和和试样在不同吸力下得到不同的剪切强度,这样点 $(0, c')$ 和点 (u_s, τ) 之间连线

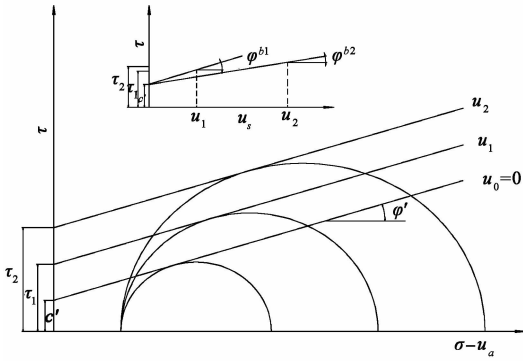


图8 φ^b 的确定方法

Fig. 8 The determination of φ^b

的倾角即是吸力为 u_s 时的 φ^b 。

图9表示了试样在不同吸力下求出的 φ^b 角。可以看出随着净围压的增大,基质吸力变小,得到的 φ^b 也越小。在工程实践中,可以根据围压及吸力情况,选择相应的 φ^b 角进行强度计算。

4.2.4.2 常含水量试验抗剪强度破坏包面

绘制不同净围压下的非饱和红土引申的 Mohr-

Coulomb 抗剪强度(图10)。随着基质吸力的增大,破坏包面有变陡,土体强度得到了提高。非饱和土的破坏包线均高于饱和土的破坏包线,说明非饱和强度大于饱和土强度。

4.2.4.3 吸力对抗剪强度的贡献

根据试验分析结果,得到巴东非饱和红土强度指标(表3)。红土的抗剪强度随着基质吸力的增加而增加。 φ^b 随基质吸力增大没有明显的变化规律,但都小于有效内摩擦角 φ' (表2)。

φ^b 随吸力而变,抗剪强度公式(2)中 $\tan\varphi^b$ 不是常数,吸力产生的吸附强度则不是独立的状态变量。将换算成倒数的吸附强度和基质吸力绘制于坐标系中进行公式拟合,发现两者之间有着较好的线性关系(图11)。拟合公式如下:

$$1/\tau_s = 2.4336/u_s - 0.0247 \quad (3)$$

$$\tau_s = u_s / (2.4336 - 0.0247u_s) \quad (4)$$

吸附强度和吸力关系如下:

$$\tau_s = u_s / (A - Bu_s) \quad (5)$$

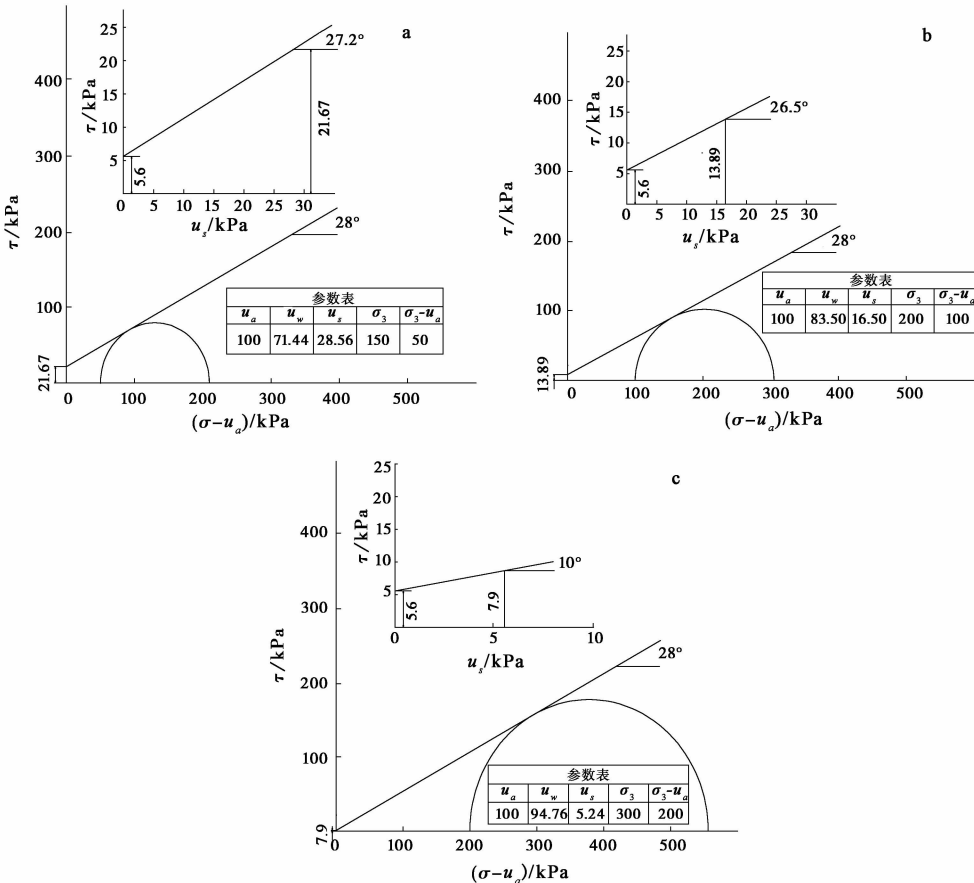


图9 巴东非饱和红土三轴试验结果

Fig. 9 Results of triaxial test for Badong unsaturated red clay

表 3 巴东非饱和土红土强度指标参数

Table 3 Strength parameters of unsaturated red clay

净围压 $\sigma_3 - u_a / \text{kPa}$	基质吸力 $u_a - u_w / \text{kPa}$	总黏聚力 C_{total} / kPa	吸附强度 τ_s / kPa	$\phi^b /$ ($^\circ$)
0	0	5.6	0	28
50	28.56	21.67	16.07	27.2
100	16.5	13.89	8.29	26.5
200	5.24	7.9	2.3	10

其中, A, B 为试验参数, 在此 $A = 2.4336$; $B = 0.0247$ 。

因此笔者提出巴东非饱和红土的建议抗剪强度公式为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + u_s / (A - Bu_s) \quad (6)$$

这样 $u_s / (A - Bu_s)$ 就可代替 $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ 而成为独立的状态变量。当 $u_s = 0$ 时, 公式(6)就退变成饱和土的抗剪强度公式。

5 结论

(1) 根据 GDS 饱和土 CD 试验, 得到饱和强度

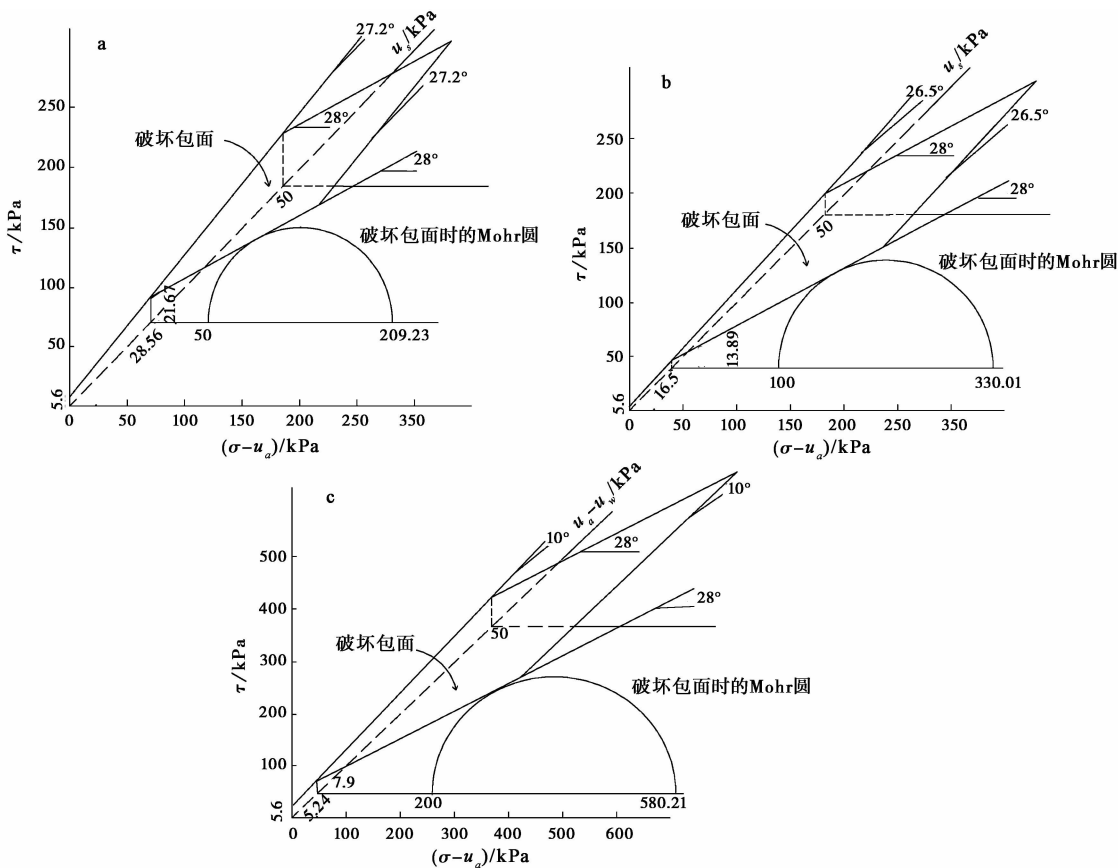


图 10 三轴试验引申的 Mohr-Coulomb 破坏包面

Fig. 10 Explicated Mohr-Coulomb destroying planes of triaxial test

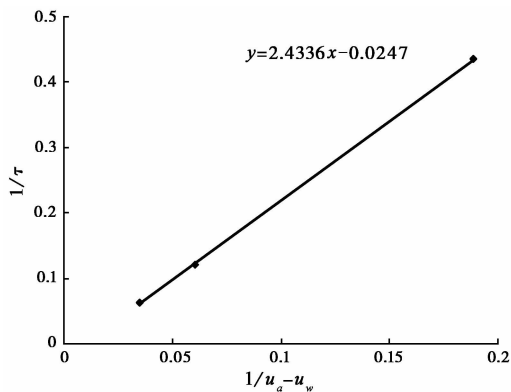


图 11 $1/\tau_s$ 与 $1/u_a - u_w$ 关系拟合线

Fig. 11 Relation fitting line of $1/\tau_s$ and $1/u_s$

指标 $c' = 5.6 \text{ kPa}$, $\phi' = 28^\circ$, 并以此作为非饱和土强度特性研究的参照零点。

(2) 非饱和土强度公式中, 总有效黏聚力 c' 随基质吸力的增大而增大; 随吸力变化的内摩擦角 ϕ^b 在不同试验围压下, 得到不同的值。

(3) 巴东组非饱和红土抗剪强度随着基质吸力增大而增大, 基质吸力随着含水量的增大而减小, 水

敏感性强。这导致路堑边坡天然状态下稳定,降雨条件下土体强度迅速下降,边坡产生变形破坏。

(4)提出了针对该工程区域内的巴东组非饱和红土建议的抗剪强度公式: $\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + u_s / (A - Bu_s)$ 其中 A 、 B 为试验参数,对于巴东组红土 $A = 2.4336$; $B = 0.0247$ 。

(5)在评价宜巴高速公路路堑边坡稳定性中,开挖后自然工况下土体强包含了基质吸力的贡献,土体强度较高。降雨条件下,土体强度因为吸力降低而明显降低。因此在开挖路堑边坡时用天然工况下土体强度评价边坡是稳定的,忽略基质吸力对强度的贡献而不采取相应支护措施,实践证明是不安全的。

参 考 文 献

- [1] 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, **25**(5): 732 ~ 736.
Wu Junjie, Wang Chenghua, Li Guangxin. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(5): 732 ~ 736.
- [2] 余宏明, 胡艳欣, 唐辉明. 红色泥岩风化含砾黏土的抗剪强度参数与物理性质相关性研究[J]. 地质科技情报, 2002, **21**(4): 93 ~ 95.
Yu Hongming, Hu Yanxin, Tang Huiming. Research on the relativity between the strength of red mudstone weathared pebble soil and physical characters. Geological Science and Technology Information, 2002, **21**(4): 93 ~ 95.
- [3] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 拓勇飞. 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 Yingwen, Kong Lingwei, Guo Aiguo, Tuo Yongfei. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(4): 568 ~ 572.
- [4] 谈云志. 压实红黏土的工程特征与湿热耦合效应研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- Tan Yunzhi. Study on Engineering Characteristics and Moisture-heat Coupling Effect of Compacted Laterite Soil. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [5] Bishop AW, Blight GE. Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils [J]. Geotechnique, 1963, **13**(3): 177 ~ 196.
- [6] Fredlund DG, Rahardjo H. Soil Mechanical for Unsaturated Soils [M]. 1997.
- [7] Zhan Liangtong. Field and Laboratory Study of an Unsaturated Expansive Soil Associated with Rain-Induced Slope Instability [M]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2003.
- [8] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 196 ~ 201.
Zhan Liangtong, Wu Hongwei. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 196 ~ 201.
- [9] NG C WW, Zhan LT, Cui YJ. A new simple system for measuring volume changes in unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(2): 757 ~ 764.
- [10] 黄志全, 陈宇, 宋日英, 宋丽娟. 三门峡地区黄土状粉质黏土非饱和性质试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(6): 1759 ~ 1762.
Huang Zhiquan, Chen Yu, Song Riyang, Song Lijuan. Experimental study of unsaturated loess-like silty clay in Sanmenxia area. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(6): 1759 ~ 1762.
- [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): 725 ~ 729.
Tan Yunzhi. Study on the triaxial tests of unsaturated lateritic soil. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009, **32**(5): 725 ~ 729.
- [12] 包承钢. 包承钢岩土工程研究文集[M]. 武汉: 长江出版社, 2007.
Bao Chenggang. Bao Chenggang's Selected Papers on Study of Geotechnical Engineering. Wuhan: Yangtze River Press, 2007.
- [13] Chen Zhenghan, Zhou Haiqing, Fredlund DG. A non-linear model for unsaturated soils [A]. In: Pro. of 2nd Int. Conf. on Unsat. Soils [C]. 1998, 1.