

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.05.007

非饱和玄武岩残积土强度特性及其边坡稳定性分析

李勇¹, 雷学文¹, 孟庆山², 陈洁^{1,3}, 张浪¹

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 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, 湖北 武汉 430071; 3. 仲恺农业工程学院 城市建设学院, 广东 广州 510225)

摘要: 为探究非饱和土抗剪强度及其指标随含水率的变化规律, 以毕威高速公路沿线某边坡黄褐色玄武岩残积土为研究对象, 进行了控制含水率的直剪试验和土水特征曲线测试试验, 通过 Abaqus 建立以此边坡为原型的有限元模型, 在此基础上运用强度折减法对不同含水率的边坡进行稳定性分析, 并结合试验所得的土水特征曲线分析基质吸力对边坡稳定性的影响。结果表明: 随含水率增大, 抗剪强度先基本不变后大幅度减小, 黏聚力与内摩擦角均呈阶段性减小; 基质吸力对抗剪强度的贡献随基质吸力的增大而逐渐减小并最终趋近于无影响; 含水率对玄武岩残积土边坡稳定性有较大的影响, 边坡土体的含水率大于 30% 后, 随含水率增加, 边坡安全系数大幅度降低; 含水率增大会降低土体的基质吸力, 在边坡土体接近饱和时, 基质吸力的丧失对边坡稳定性影响最大, 此时边坡最易失稳滑塌。

关键词: 道路工程; 玄武岩残积土; 直剪试验; 抗剪强度; 边坡稳定性; 基质吸力

中图分类号: U412.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 05-0050-07

Study on Strength Characteristics of Unsaturated Basalt Residual Soil and Its Slope Stability

LI Yong¹, LEI Xue-wen¹, MENG Qing-shan², CHEN Jie^{1,3}, ZHANG Lang¹

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430065, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071; 3. School of Urban Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou Guangdong 510225, China)

Abstract: In order to explore the rule of shear strength and its indexes varying with water content of unsaturated soil, the direct shear test of controlled water content and the test of soil-water characteristic curve on the brown basalt residual soil from a selected slope of Bijie—Weining expressway are conducted. Based on the finite element model of the slope established by Abaqus, the slope stability with different water contents are analysed by shear strength reduction method, and the effect of matrix suction on slope stability is analyzed with the soil-water characteristic curve obtained from the experiment. The result shows that (1) with the increase of water content, the shear strength basically remains at first and then decreases significantly the cohesion and internal friction angle present a trend of decrease in stage; (2) the contribution of matrix suction to shear strength gradually decreases and eventually tends to zero with the increase of matrix suction; (3) water content has a great influence on the stability of the basalt residual soil slope, and the safety factor of the slope is greatly reduced with the increase of the water content when the water content of the slope is

收稿日期: 2016-07-26

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目 (2009318802074)

作者简介: 李勇 (1992-), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生. (2410268750@qq.com)

more than 30%; (4) the increase of water content will decrease the matrix suction of soil mass, and the loss of matrix suction has the biggest influence on the slope stability when the slope soil is close to saturation, at this time the slope is the most vulnerable.

Key words: road engineering; basalt residual soil; direct shear test; shear strength; slope stability; matrix suction

0 引言

玄武岩残积土是玄武岩经物理和化学风化后而残留在原地的残积物, 西部交通工程建设过程中常遇到此类土。受西南地区湿热、多雨的季风气候影响, 雨水的入渗和蒸发使其常处于含水率变动的非饱和状态, 加之玄武岩自身节理、裂隙发育^[1], 为雨水入渗提供了有利条件, 长期的降雨会使坡面出现坍塌、滑坡等灾害。

非饱和土强度特性及其边坡稳定性研究一直是岩土工程界的一个重要的课题, 许多学者对此进行了研究。大量的统计资料表明: 大多数的地质灾害是发生在降雨期间或降雨之后, 且呈现出随降雨量增多而增强的规律^[2]。陈南等^[3]分析了红黏土浅层滑坡的破坏机理, 提出了合理的评定性方法。陈东霞等^[4]探究了非饱和花岗岩残积土抗剪强度与基质吸力、含水率间的关系, 认为基质吸力对含水率的变化敏感性很强, 且基质吸力对抗剪强度有很大的贡献, 许四法等^[5]在非饱和粉质黏土的研究中也得到了类似的结论。员康峰等^[6]通过非饱和直剪试验探究了膨胀土黏聚力、内摩擦角与基质吸力的关系, 并结合有限元分析得出基质吸力对边坡稳定性有较大影响的结论。刘顺青等^[7]探究了粉状和砾状煤系土的水敏性, 并结合强度折减法分析了含水率对边坡稳定性的影响规律。张社荣等^[8]结合强度折减法计算分析了瞬态渗流作用下的边坡稳定性, 认为低强度长持时的降雨会增加深层土体的孔隙水压力,

易使边坡产生深层滑动失稳。李哲等^[9]、楼晓昱等^[10]、马士国等^[11]认为雨水入渗会使边坡表面及其内部孔隙水压力增大, 基质吸力逐步丧失而使边坡土体最终达到饱和状态, 导致边坡安全系数降低。

然而, 由于受土体的结构、土颗粒的矿物成分、应力历史状态等条件的影响, 非饱和土的抗剪强度随基质吸力变化的规律对于不同的土体具有较大的差异性^[4, 5, 12], 因而不同的土体中基质吸力对边坡稳定的影响也有所不同。目前, 关于玄武岩残积土的研究主要集中在其天然状态和饱和状态的物理特性及工程运用上, 王参松等^[13]、徐良等^[14]探究了玄武岩残积土的工程及力学特性, 张瑞敏等^[1]、余沛等^[15]探究了玄武岩残积土的胀缩性, 唐军等^[16]探究了玄武岩残积土的崩解性, 而利用非饱和土力学原理与方法来研究其强度特性及边坡稳定性却较少。因此, 此次试验研究通过直接剪切试验探究了含水率与抗剪强度及其指标的关系, 在此基础上运用强度折减法进行了边坡稳定性分析, 并结合试验测试所得土水特征曲线分析了基质吸力对非饱和玄武岩残积土边坡稳定性的影响。

1 强度特性试验及分析

1.1 强度特性试验

(1) 土样基本物理性质

试验土样取自贵州省境内毕威高速公路玄武岩残积土坡, 为黄褐色粉质黏土, 其物理力学性质如表 1 所示。

表 1 玄武岩残积土物理力学性质指标

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of basalt residual soil

天然密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率 $W/$ %	土粒相对密度 G_s	液限 $W_L/$ %	塑限 $W_P/$ %	塑性指数 I_L	黏粒 (<0.075 mm) 含量/%	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
1.76	25.6	2.72	59.62	43.07	16.55	90.45	4.3	0.3

(2) 直接剪切试验

试验采用重塑土样, 干密度为 $1.29 g/cm^3$, 根据设计含水率 27.5%, 30%, 32.5%, 35%, 37.5%, 40%, 42.5% 和 45%, 制备试样并进行直接剪切试验。试验装置为 FDJ-20 型非饱和直剪仪, 采用不固结快剪试验, 剪切速率为 0.8 mm/min, 竖

向荷载分别为 50, 100, 200, 400 kPa, 剪切位移取 7 mm。为了尽可能的减小剪切过程中水分的散失, 采用不透水的塑料薄膜代替滤纸将试样与透水石隔开, 并在剪切盒上围放含水率与试样含水率一致的纱布。剪切试验结果如表 2 所示。

(3) 土水特征曲线试验

表2 不同含水率下玄武岩残积土的强度指标
Tab.2 Strength indexes of basalt residual soil with different water contents

含水率/%	各级荷载下的抗剪强度/kPa				黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	基质吸力/kPa
	50	100	200	400			
27.5	67	90	174	254	35.4	28.7	889
30	58	95	140	252	34.4	28.5	526
32.5	51	90	144	242	31.7	28.1	340
35	45	85	126	217	29.4	25.4	210
37.5	38	67	103	150	24	21.0	139
40	26	45	72	120	16.5	14.7	92
42.5	19	24	42	60	12.1	7.8	40
45	18	20	37	55	10.8	6.7	5

配制与直剪试验相同干密度、含水率的试样，采用滤纸法（国产双圈牌 No. 203 型定量慢速滤纸）测定其基质吸力，其土水特征曲线如图 1 所示。

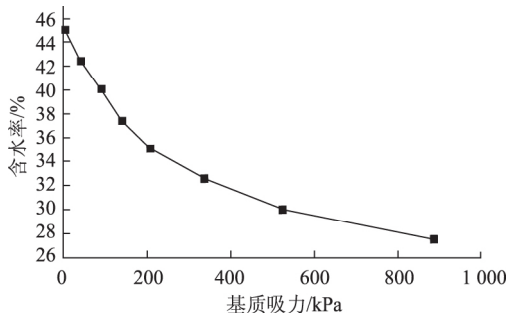


图1 土水特征曲线

Fig.1 Soil-water characteristic curve

1.2 试验结果分析

试验为不固结快剪试验，因此获得的抗剪强度为总应力强度，抗剪强度指标为表观黏聚力和表观内摩擦角，都隐含了基质吸力的影响^[4,12]。

(1) 黏聚力与含水率的关系

黏聚力与含水率关系如图 2 所示。由图 2 可知，黏聚力随含水率的增大呈逐步减小的趋势且具有较强的阶段性。非饱和黄褐色玄武岩残积土的黏聚力主要由土颗粒间的静电引力、基于表面张力所形成的水膜连接力以及土体自身含有游离氧化铁所形成的特殊胶结作用力而组成。其中水膜连接力和胶结作用力与土体含水率密切相关。由于胶结作用力来自于土体自身，只有当土体中的自由水超过界限后，胶结物才会逐步溶解，因而在曲线第 1 段，随含水率的增大，主要是水膜连接力在减小，黏聚力下降的速度较小；在曲线第 2 段，随含水率增大，胶结作用开始丧失导致黏聚力减小的速度加快；在曲线的第 3 段，随含水率继续增大，土体接近饱和状态，水膜连接力基本为零，胶结物的溶解逐渐趋于稳定，

此阶段随含水率增加，黏聚力下降的速度逐步减小且最终将趋近于零。

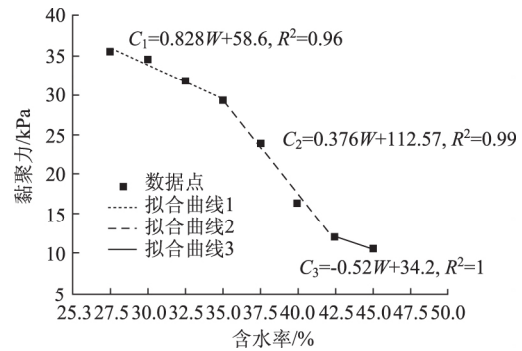


图2 黏聚力与含水率关系曲线

Fig.2 Relationship curve of cohesion with water content

(2) 内摩擦角与含水率的关系

内摩擦角与含水率关系如图 3 所示。由图 3 可发现，内摩擦角随含水率的增大呈逐渐减小的趋势。在含水率小于 32.5% 的范围内，随含水率的增大，内摩擦角减小的速率较慢，可认为随含水率的增大，内摩擦角几乎不变；含水率超过 32.5% 时，随含水率增大，内摩擦角减小速度较快且基本呈线性减小趋势。

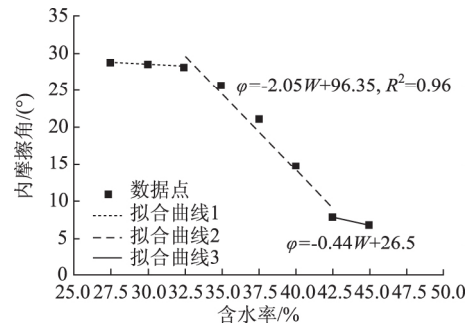


图3 内摩擦角与含水率关系曲线

Fig.3 Relationship curve of friction angle with water content

内摩擦角的大小反映了土体的摩擦强度，主要由滑动摩擦强度和咬合强度两部分组成。原状玄武岩残积土经风干重塑后，胶结物氧化铁从游离态转变为胶结态和结晶态共存，且此过程具有不可逆性。胶结态游离氧化铁在土体中形成粒团结构，结晶态氧化铁附着于土颗粒表面使其具有较大的粗糙度。在较低的含水率范围内，不同的含水率在相邻的土颗粒间形成的公共水化膜厚度较薄，土体中的水对土颗粒间的润滑作用微弱，故而随含水率的增加，内摩擦角下降的幅度很小。当含水率超过某一界限值后，随含水率的增大，公共水化膜厚度增大，土颗粒间的自由水增多，对土颗粒间润滑作用增大，导致滑动摩擦强度减小；同时随含水率的增大，游离氧化铁的胶结作用减弱，粒团较小的部分被包裹

于公共水化膜中, 导致土颗粒间的咬合强度减小。因而, 在较高含水率范围内, 内摩擦角随含水率增大而显著减小。

(3) 含水率对抗剪强度的影响

图 4 为抗剪强度与含水率关系曲线, 由图 4 可知, 不同竖向荷载作用下, 抗剪强度随含水率变化特征基本一致, 呈先不变后大幅减小的趋势。且竖向荷载越大, 抗剪强度随含水率增加下降的幅度越大。竖向荷载为 50 kPa, 含水率从 27.5% 增加到 45% 时, 抗剪强度由 67 kPa 下降到 18 kPa, 降幅为 73%; 竖向荷载为 400 kPa, 含水率从 27.5% 增加到 45% 时, 抗剪强度由 254 kPa 下降到 55 kPa, 降幅为 78%。对于边坡土体而言, 当雨水入渗使深层土体饱和时, 会导致抗剪强度丧失过大而诱发边坡失稳滑塌。

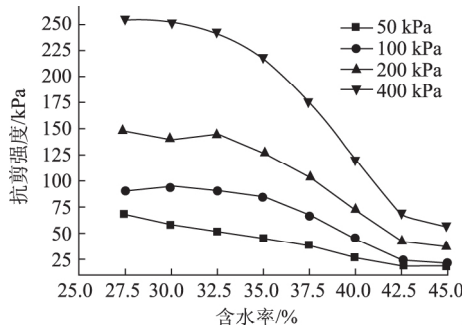


图 4 抗剪强度与含水率关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of shear strength with water content

(4) 基质吸力对抗剪强度的影响

不同竖向应力下, 非饱和玄武岩残积土的抗剪强度与基质吸力的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 在各级竖向荷载作用下, 基质吸力对抗剪强度的影响大致可以分为 3 段。基质吸力在 0 ~ 210 kPa 的范围内 (阶段 I), 抗剪强度随基质吸力的增大显著增加; 在 210 ~ 526 kPa 的范围内 (阶段 II), 随基质吸力的增大, 基质吸力对抗剪强度的贡献相比

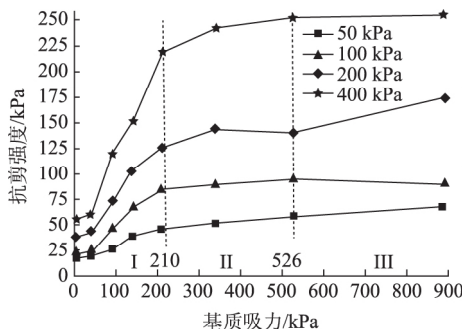


图 5 抗剪强度与基质吸力关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of shear strength with matric suction

阶段 I 明显减小; 当基质吸力大于 526 kPa 后 (阶段 III), 抗剪强度随基质吸力的增大几乎不变, 这与各类非饱和土中对抗剪强度有影响的基质吸力范围^[17]通常为 0 ~ 500 kPa 的结论相一致。由此说明, 试验所获得的抗剪强度隐含了基质吸力的影响, 基质吸力在一定范围内对非饱和玄武岩残积土的抗剪强度有明显的提高作用, 这种提高作用会随基质吸力的增大而有所下降, 即基质吸力对抗剪强度的贡献是有限的。反之, 当土体中的含水率增大时, 非饱和土体中的基质吸力减小会导致抗剪强度降低。

2 边坡稳定性分析

2.1 工程概况

毕威高速公路 (毕节至威宁) 沿线穿越玄武岩分布地带, 地形地貌复杂, 地貌类型变化大, 高陡边坡多, 坡面上常附有厚度较大的坡积物, 导致施工过程中地质灾害频发, 严重威胁公路的建设安全。因此, 开展玄武岩残积土的边坡稳定分析具有重要的实际价值。

2.2 计算模型建立

以毕威高速公路某右侧滑坡为研究对象, 该段玄武岩残积土滑坡的自然坡度约为 36°, 坡高 16 m, 线路从斜坡下部通过, 如图 6 所示。边坡上覆残、坡积耕植土厚小于 0.5 m, 下部为全风化黄褐色玄武岩残积土, 厚度大于 24 m, 为均质土坡, 以此滑坡为原型建立简化后的理想模型, 其基本力学参数如表 1 所示。郑颖人等^[18]的研究表明弹性模量与泊松比对边坡安全系数的计算结果基本无影响, 故可将各含水率下的弹性模量与泊松比统一取为天然含水率状态下的数值。



图 6 高速公路沿线某滑坡现场

Fig. 6 Scene of a landslide along expressway

约束模型左右边界的水平位移, 底部边界的水平和竖向位移。计算模型中的土体采用 Mohr-Coulomb 破坏准则, 计算时采用关联流动法则。采用强度折减法对各含水率下的黏聚力和内摩擦角进行

折减，求取各含水率下边坡的安全系数。

2.3 边坡安全系数的确定及结果分析

强度折减法其基本实质是材料的 c 和 φ 逐渐降低，导致某些单元的应力无法与强度相匹配，或超出了屈服面，不能承受的应力将逐渐转移到周围土体单元中去，当出现连续滑动面（屈服点连成贯通面）后，土体就将失稳。利用 Abaqus 提供的 combine 函数绘制场变量 $FV1$ 与 X 方向的位移 $U1$ 关系曲线，如图 7 所示，以位移突变点所对应的折减系数为此含水率状态下边坡的安全系数。由图 7 可知，对于含水率为 42.5% 的边坡，当折减系数小于 0.61 时，随着折减系数增大，边坡水平向的位移值几乎不变；但当折减系数超过 0.61 时，随折减系数增大，边坡土体水平向位移陡然增大，此时边坡失稳。

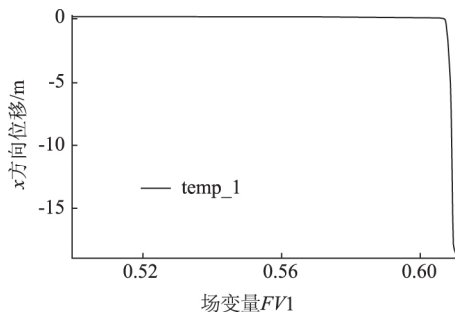


图 7 场变量 $FV1$ 随水平位移变化曲线

Fig. 7 Curve of horizontal varying with displacement field variation $FV1$

边坡失稳后，边坡内部会产生明显的塑性区并逐步形成贯通区，贯通区外部的土体变形相差十分明显，此后位移快速增加，失稳的边坡土体将沿着贯通区滑出，边坡失稳时的塑性应变云图及滑动面云图分别如图 8、图 9 所示。

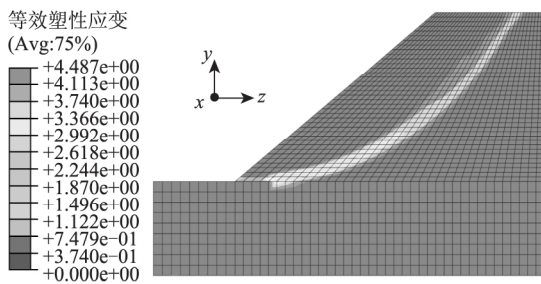


图 8 塑性应变云图

Fig. 8 Nephogram of PLASTIC strain

在此模型的基础上，通过强度折减法对含水率分别为 27.5%、30%、32.5%、35%、37.5%、40% 和 45% 的边坡进行计算分析，求取各含水率下边坡的安全系数，分析含水率对边坡稳定的影响，含水率与安全系数关系如图 10 所示。由图 10 可知，

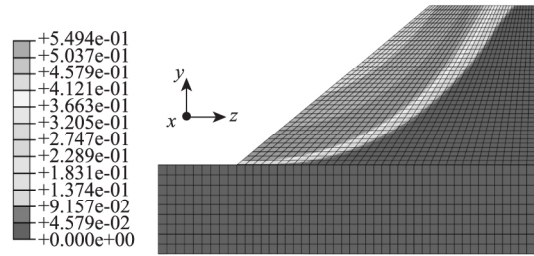


图 9 增量位移云图 (单位: m)

Fig. 9 Nephogram of incremental displacement (unit: m)

随着含水率的增大，非饱和黄褐色玄武岩残积土的边坡安全系数逐渐减小。在较低的含水率范围内 (27.5% ~ 30%)，边坡安全系数基本不变，含水率超过 30% 后，随含水率增大，边坡安全系数几乎成直线下降，当边坡土体含水率大于 39.1% 时，计算所得的安全系数均小于 1，而实际上边坡已发生失稳滑塌。

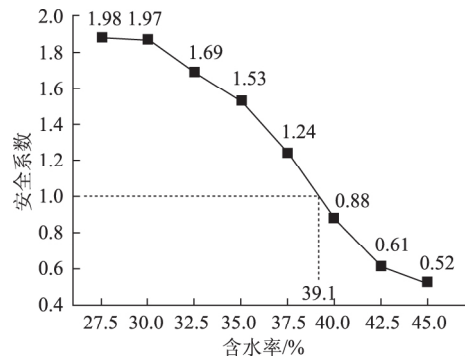


图 10 不同含水率下边坡土体安全系数

Fig. 10 Safety factor of basalt residual soil of slope with different water contents

Fredlund 非饱和剪切强度理论表明^[19]，基质吸力是非饱和土抗剪强度的重要组成部分，边坡土体的安全系数与土体的抗剪强度成正比关系，且此次试验为不固结快剪试验，所得的黏聚力和内摩擦角均包含了基质吸力的影响，因此可用边坡的安全系数来间接的反应基质吸力对边坡稳定性的影响。结合滤纸法所得的土水特征曲线（含水率与基质吸力关系曲线）与强度折减法所得各含水率下边坡的安全系数绘制如图 11 所示的安全系数与基质吸力的关系图，由图 11 可知，基质吸力越大，安全系数越高，且基质吸力对边坡安全系数的影响大致可分为 3 段。在此次试验设置的条件下，对安全系数与基质吸力关系曲线进行分段线性拟合分析后可初步认为，当基质吸力大于 526 kPa 时（此值大小与干密度、温度有关，在此次试验设置的条件下为 526 kPa），基质吸力对边坡安全系数基本无影响，此段斜率 k_3 几

乎为0; 在小于 526 kPa 的基质吸力范围内, 根据基质吸力对安全系数影响的大小可将基质吸力与安全系数的曲线分为两直线段 ($k_1 > k_2$), 这与基质吸力对抗剪强度的影响一致, 因此可认为边坡土体在接近饱和状态时, 基质吸力丧失的最快, 且此时基质吸力的丧失对边坡稳定性的影响最大。

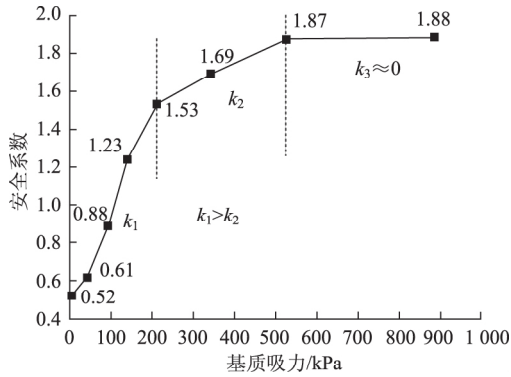


图 11 安全系数与基质吸力关系曲线

Fig. 11 Relationship between safety factor and matric suction

3 讨论

玄武岩残积土具有显著的水敏性, 边坡土体含水率的增大会使土体抗剪强度大幅度下降而导致边坡失稳滑塌。毕威高速公路沿线穿越大量的玄武岩残积土质边坡, 为保证公路能安全稳定的运行, 需采取相应的措施降低边坡土体的雨水入渗量^[3,11]。结合此次试验研究结论及毕威高速公路沿线边坡的特点, 给出了以下建议: (1) 修建并完善边坡土体的排水系统, 及时疏导边坡雨水。(2) 加强边坡的勘察检测, 及时封堵坡体中的裂隙, 减小边坡土体的雨水入渗量。(3) 对于裸露的边坡土体, 应及时采取挂网喷射混凝土或植物生态护坡等措施, 减小雨水冲刷面积。(4) 对于高陡边坡, 应及时刷方减重并修建挡土墙以提高边坡的稳定性。

4 结论

(1) 含水率对非饱和玄武岩残积土的抗剪强度及其指标具有显著影响。随含水率的增大, 抗剪强度先基本不变后大幅减小, 黏聚力呈先小幅度减小后急剧下降的特点, 内摩擦角呈先不变后线性减小的特点。

(2) 在 526 kPa 的基质吸力范围内, 基质吸力对抗剪强度的影响呈阶段性减小; 当基质吸力超过 526 kPa 后, 基质吸力对抗剪强度基本无影响。

(3) 边坡土体含水率在 30% 以内, 边坡稳定安全系数与含水率关系不大。含水率超过 30% 以后, 随含水率增大, 边坡稳定安全系数基本呈线性减小且减小的幅度较大, 在边坡土体接近饱和时, 安全系数最低, 此时边坡最易发生失稳滑塌。

(4) 在约 526 kPa 基质吸力范围以内, 基质吸力的变化对非饱和玄武岩残积土边坡稳定性有较大影响, 随基质吸力降低, 安全系数阶段性减小。可认为含水率增大, 导致边坡土体的基质吸力降低, 是边坡安全系数降低的最主要原因之一, 玄武岩残积土自身的弱膨胀性、崩解性等对边坡稳定性的影响还有待进一步探究。

参考文献:

References:

- [1] 张瑞敏, 余沛, 苗方利. 玄武岩残积红土的收缩特性试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12 (5): 23-29.
ZHANG Rui-min, YU Pei, MIAO Fang-li. Experimental Study on the Shrinkage Characteristics of the Residual Soil of Basalt [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12 (5): 23-29.
- [2] 崔云, 孔纪名, 田述军, 等. 强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键作用 [J]. 山地学报, 2011, 29 (1): 87-94.
CUI Yun, KONG Ji-ming, TIAN Shu-jun, et al. The Critical Role for Heavy Rainfall in the Evolution of the Mountain Hazards Chains [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29 (1): 87-94.
- [3] 陈南, 吴立坚, 周勇, 等. 红黏土边坡浅层破坏机理及稳定评价方法 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (3): 37-42, 88.
CHEN Nan, WU li-jian, ZHOU Yong, et al. Failure Mechanism of Shallow Layer of Red Clay Slope and Stability Evaluation Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (3): 37-42, 88.
- [4] 陈东霞, 龚晓南, 马亢. 厦门地区非饱和残积土的强度随含水量变化规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (增1): 3484-3490.
CHEN Dong-xia, GONG Xiao-nan, MA Kang. Variation of the Shear Strength of Xiamen Unsaturated Residual Soils with Water Content [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S1): 3484-3490.
- [5] 许四法, 王志健, 胡琪, 等. 重塑非饱和和粉质黏土抗剪强度特性试验研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 41 (1): 1-5.

- 2015, 43 (2): 227-231.
- XU Si-fa, WANG Zhi-jian, HU Qi, et al. An Experimental Study on the Shear Strength Characteristics of Remolded Unsaturated Silty Clay [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, 43 (2): 227-231.
- [6] 员康锋, 赵建斌. 考虑基质吸力影响的非饱和均质边坡稳定性分析 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016, 38 (4): 531-533, 576.
- YUAN Kang-feng, ZHAO Jian-bin. Effect of Matric Suction on the Stability of Unsaturated Homogeneous Slope [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2016, 38 (4): 531-533, 576.
- [7] 刘顺青, 洪宝宁, 朱俊杰, 等. 粉状和砾状煤系土的水敏性及边坡稳定性分析 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (8): 143-149.
- LIU Shun-qing, HONG Bao-ning, ZHU Jun-jie, et al. Study on the Water Sensitivity of Powered and Rudaceous Soil of Coal Measure Strata and Slope Stability Analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (8): 143-149.
- [8] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (增2): 4102-4112.
- ZHANG She-rong, TAN Yao-sheng, WANG Chao, et al. Influence of Heavy Rainfall Characteristics on Saturated-unsaturated Slope Failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S2): 4102-4112.
- [9] 李哲, 张昌军, 梅华. 人工降雨条件下黄土斜坡土体孔隙水压力测试研究 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (12): 45-52.
- LI Zhe, ZHANG Chang-jun, MEI Hua. Measurement of Pore Water Pressure of Loess Slope under Artificial Rainfall [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (12): 45-52.
- [10] 楼晓昱, 曾铃. 浅层坡积土边坡在降雨作用下的地表产流过程分析 [J]. 中外公路, 2016, 36 (1): 23-27.
- LOU Xiao-yu, ZENG Ling. Analysis of Surface Runoff Process of Shallow Soil Slope under Rainfall [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2016, 36 (1): 23-27.
- [11] 马世国, 韩同春, 徐日庆. 强降雨和初始地下水对浅层边坡稳定的综合影响 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 43 (3): 803-810.
- MA Shi-guo, HAN Tong-chun, XU Ri-qing. Integrated Effect of Intense Rainfall and Initial Groundwater on Slope Stability [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2014, 43 (3): 803-810.
- [12] 闫亚景, 文宝萍, 计博勋. 基质吸力对非饱和重塑黄土抗剪强度的贡献 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (6): 865-874.
- YAN Ya-jing, WEN Bao-ping, JI Bo-xun. Contribution of Matric Suction to Shear Strength of Unsaturated Remolded Loess Soils [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (6): 865-874.
- [13] 王参松, 雷学文, 孟庆山. 滇黔地区黄褐色玄武岩风化土强度试验研究 [J]. 人民长江, 2012, 43 (9): 47-50.
- WANG Can-song, LEI Xue-wen, MENG Qing-shan. Experimental Study on Soil Strength of Ochre Weathered Basalt in Guizhou and Yunnan Province [J]. Yangtze River, 2012, 43 (9): 47-50.
- [14] 徐良, 柴寿喜, 魏厚振, 等. 玄武岩残积土综合原位测试与分析研究 [J]. 工程勘察, 2010, 40 (10): 5-9, 15.
- XU Liang, CHAI Shou-xi, WEI Hou-zhen, et al. Study on In-situ Comprehensive Testing for the Residual Soil of Basalt [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2010, 40 (10): 5-9, 15.
- [15] 余沛, 张著芳, 魏厚振, 等. 考虑干湿循环影响下玄武岩残积土渗透系数的试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9 (5): 63-66, 104.
- YU Pei, ZHANG Zhu-fang, WEI Hou-zhen, et al. Experimental Study on Permeability Coefficient of Basalt Residual Soil Considering Influence of Drying and Wetting Cycle [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9 (5): 63-66, 104.
- [16] 唐军, 余沛, 魏厚振, 等. 贵州玄武岩残积土崩解特性试验研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (5): 778-783.
- TANG Jun, YU Pei, WEI Hou-zhen, et al. Slaking Behaviour of Weathered Basalt Residual Soil in Guizhou [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (5): 778-783.
- [17] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUF AHL D E, et al. Model for The Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33 (3): 379-392.
- [18] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (19): 3381-3388.
- ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of Strength Reduction FEM in Soil and Rock Slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (19): 3381-3388.
- [19] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WILDGER R A. The Shear Strength of Unsaturated Soils [J]. Canadian Geotechnique Journal, 1978, 15 (3): 311-321.