

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.03.007

红黏土边坡浅层破坏机理及稳定评价方法

陈南¹, 吴立坚¹, 周勇², 邓捷¹

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100086; 2. 贵州高速公路开发总公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 针对红黏土边坡稳定性评价的问题, 采用现场试验的方法对边坡浅层破坏机理进行了研究, 提出了适用的稳定安全性评价方法。在现场进行了边坡不同深度土体含水率测试, 通过烘干法得出了扰动土湿度场分布及变迁的规律, 分析了土体深度、土质类型、季节以及边坡防护类型对湿度场的影响; 开展了动力圆锥贯入测试, 得到不同防护类型边坡的测试曲线, 根据测试结果近似确定了边坡实际扰动深度, 从而确定了红黏土边坡浅层破坏典型模式。针对简化毕肖普法用于红黏土边坡稳定评价的不合理性, 提出能够客观反映裂隙影响的“裂隙水压力推力平衡法”, 并且在实际工程中进行了验证。

关键词: 道路工程; 红黏土边坡; 稳定评价方法; 动力圆锥贯入; 湿度场; 边坡失稳

中图分类号: U412.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 03-0037-06

Failure Mechanism of Shallow Layer of Red Clay Slope and Stability Evaluation Method

CHEN Nan¹, WU Li-jian¹, ZHOU Yong², DENG Jie¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100086, China;

2. Guizhou Expressway Development Corporation, Guiyang Guizhou 550000, China)

Abstract: To deal with the problem of stability evaluation of red clay slopes, the failure mechanism of shallow layer of red clay slope is researched with field test, and a suitable stability evaluation method is proposed. The moisture contents in various depths of the slope are tested, the moisture field distribution of disturbed soil of the slope and its change law are obtained by oven drying method, and the influence of soil depth, soil types, seasons and protections on moisture field is also analyzed. The DCP test is conducted to obtain the curves of different protection types of slope, and the real disturbing depth is approximately determined according to the test result, thus the typical failure mode of shallow layer of red clay slope is determined. A method “crack water pressure equilibrium” which can reflect the effect of crack is proposed, which is verified in real project.

Key words: road engineering; red clay slope; stability evaluation method; dynamic cone penetration (DCP); moisture field; slope failure

0 引言

红黏土边坡整体失稳较为少见, 而坍塌、溜塌等浅层破坏非常普遍, 对公路施工和运营安全造成不利影响。在外界环境因素影响下, 边坡浅层扰动土特性的改变, 是引起浅层破坏的根本原因。分析

浅层破坏机理, 并且提出合理的稳定性评价方法, 是保证红黏土边坡稳定安全性的前提。

在红黏土边坡稳定性评价方面, 国内学者的研究主要集中在两个方面: 一是确定合理的强度参数, 二是确定切合实际的破坏模式。孔令伟^[1]在室内开展了原状土在脱湿吸湿过程的无侧限抗压强度演化

收稿日期: 2014-12-14

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目 (2011-122-033)

作者简介: 陈南 (1984-), 男, 安徽安庆人, 博士. (n.chen@rioh.cn)

特征及力学效应试验研究,发现土体强度参数同时受含水率与裂隙性的耦合影响。廖世文^[2]采取不同起始含水率的土样进行模拟剪切试验,从温度及含水率变化等方面来模拟边坡土体的干缩效应所产生的强度衰减特性。杨和平^[3]研究了干湿循环次数与强度的关系,发现模拟剪切所得的 c 和 φ 值均随循环次数增加而降低,但在干湿循环2~3次后不再继续衰减。曹志娇^[4]通过非饱和土的固结排水剪切试验,研究了抗剪强度与基质吸力之间的关系,建立了非饱和红黏土抗剪强度公式。以上研究为红黏土边坡稳定性评价强度参数合理取值提供了依据。但是,目前对工程中红黏土边坡浅层扰动土特性的认识还不够充分,传统稳定性分析方法对边坡破坏模式的假设与红黏土边坡实际破坏情况也并不相符。针对以上问题,本文通过现场测试的方法分析红黏土边坡浅层扰动土的特性,明确浅层破坏的典型模式,并且提出合理的红黏土边坡稳定性分析方法。

1 红黏土边坡浅层扰动土特性

红黏土边坡浅层破坏与土体在环境中受扰动的程度密切相关。本文采用现场测试的方法对边坡扰动土特性进行分析,测试目的包括:(1)在距坡面不同深度位置取土样,通过烘干法获取浅层土体含水率空间分布特征;(2)分别在雨季、旱季时段对同一断面进行含水率测试,分析湿度场变迁规律;(3)在各断面进行动力圆锥贯入试验(DCP),分析扰动深度范围内土体强弱变化规律。

选取贵州余凯高速及凯羊高速6个标段共33处边坡开展测试,边坡综合坡率范围1:1~1:1.75,坡高范围8~27 m,全部为1,2级边坡;防护类型包括裸坡、生物防护、骨架防护(+生物防护)及护面墙防护(+生物防护),测试路段边坡开挖完成时间基本在2013年8—10月间。

含水率测试取土深度分别为距离坡面向下0.2, 0.5, 0.8, 1, 1.2, 1.5, 2, 2.5 m及3 m,对于二级边坡分别在坡上部(坡顶附近)和中部(一级平台附近)分别进行取样。测试时间分别在2014年6月上旬(该时段黔东南地区降雨较为密集)、9月上旬及10月下旬(该时段黔东南地区降雨相对较少)。

DCP测试选取边坡土层较厚的位置进行(图1)。扰动土浸水后变得湿软,干缩开裂后较为松散,抵抗圆锥贯入的能力远小于原状土,本文根据单次锤击贯入距离来反映边坡浅层土体受扰动程度。



图1 坡面DCP测试

Fig. 1 DCP test in the field

1.1 扰动土湿度场分布特性

各断面测试结果表明,土体含水率受取样深度、季节时段、防护类型及土质变异等因素的影响;同一断面边坡坡顶附近含水率总体略小于边坡中部。

(1) 取样深度的影响

余凯线K17+720及K18+060两处二级边坡(裸坡)不同深度处湿度场分布如图2~图3所示。可以看出,在不同时段不同深度土体含水率呈现规律性变化。测试边坡地处黔东南地区,6月降雨较为密集,距坡面0~0.5 m范围内含水率普遍达到35%~45%的水平;随着深度的增加土体含水率逐步下降且趋于稳定。9月和10月份降雨较少,表层红黏土蒸发加强,0~0.5 m范围内土体含水率明显下降;随着深度的增加,蒸发作用对含水率的影响逐步降低,土体含水率呈现逐步增大并且趋于稳定的规律。由此可见,浅表土体含水率受降雨及蒸发作用的影响非常剧烈。

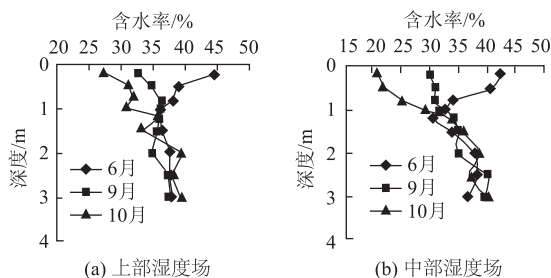


图2 余凯K17+720边坡湿度场

Fig. 2 Moisture field of Yukai K17+720 slope

图3所示,在深度1.5~2.0 m含水率出现突变,这是由于边坡土质变异造成。该边坡高度为10 m,红黏土覆盖层不厚,在1.5~2.0 m范围取样时发现样土变异为灰白色粉砂状颗粒形态。由此可见,土质变异是影响含水率分布的另一个因素。

(2) 季节时段的影响

湿度随季节发生变迁的原因是外界气候环境因素的变化。图4所示为余凯K17+720及K18+060两

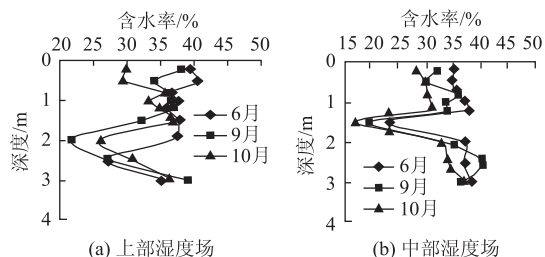


图3 余凯 K18+060 边坡湿度场

Fig. 3 Moisture field of Yukai K18+060 slope

处边坡(裸坡)6月份及10月份两个时段含水率差值(绝对值)随深度变化规律。从图中可以看出,0~0.5 m深度范围内含水率变化较大,最大可达23个百分点;深度在0.5~1.2 m范围内,变化值逐步减小,这是因为随着深度的增加,环境因素的影响逐步减弱,土体的含水率受内在因素控制而逐步趋于稳定。

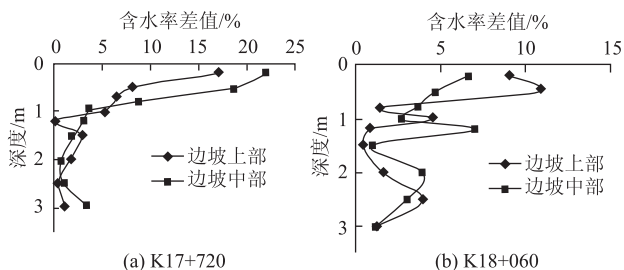


图4 余凯含水率差变化

Fig. 4 Variation of moisture content difference of Yukai slope

(3) 防护类型的影响

图5所示为余凯BK0+030及K19+440(生物防护)边坡含水率差值随深度变化规律,图6为凯羊K33+230(骨架+生物防护)及K34+890(窗格护面墙+生物防护)边坡含水率差值随深度变化规律。从图中可以看出,雨、旱两季生物防护边坡表层0~0.5 m深度范围含水率变化依旧非常明显,这是因为植被的存在并不能消除渗透与蒸发作用的影响。骨

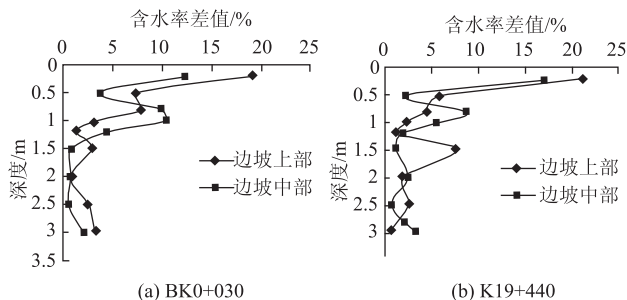


图5 余凯含水率差变化

Fig. 5 Variation of moisture content difference of Yukai slope

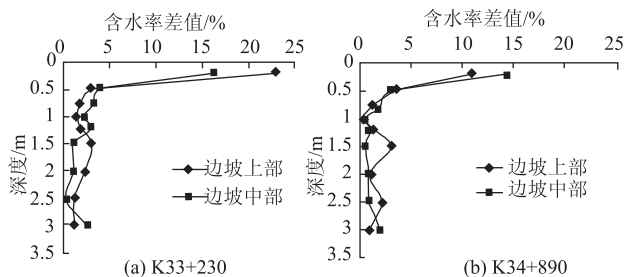


图6 凯羊含水率差变化

Fig. 6 Variation of moisture content difference of Kaiyang slope

架+生物防护及护面墙+生物防护条件下,只有表层土体含水率变化较为显著,随着深度的增加,距坡面0.5 m深度后含水率波动趋于稳定。以上规律说明,骨架及护面墙能够有效减缓降雨及冲刷的影响,从而使环境对边坡浅层土体的扰动程度明显减小。

1.2 扰动深度分析

红黏土具有裂隙性,环境对边坡土体的扰动深度比一般土质边坡更大。本文根据坡面DCP测试结果,分析边坡不同深度处红黏土强弱变化的规律,并且提出近似确定扰动深度的方法。

(1) 红黏土边坡 DCP 曲线特征

图7所示为余凯高速K17+720(裸坡)、K19+440(生物防护)、凯羊高速K33+230(骨架+生物防护)及K34+890(窗格护面墙+生物防护)4处红黏土边坡的坡面DCP测试曲线。从图中可以看出,单次锤击距离呈现出先大后小、逐步稳定的趋势。浅层土体的单次锤击距离较大,是因为浅表裂隙极为发育使得土体较为松散所致。随着贯入深度的增加,单次锤击距离逐渐减小,当贯入深度超过扰动土的范围时,圆锥受到的阻力趋于稳定,DCP曲线逐渐收敛。边坡的防护类型对DCP曲线特征有一定的影响。裸坡及生物防护边坡DCP曲线收敛过程相对较长,而骨架+生物防护及护面墙+生物防护的边坡收敛较快,这是因为防护工程减弱了环境对边坡土体的扰动程度。

(2) 扰动深度确定方法

根据以上分析,红黏土边坡DCP曲线变化规律符合“先快后慢”的S形过程。因此,可以采用S曲线模型对DCP测试曲线进行拟合,然后通过求算拐点的方法确定扰动深度。

以余凯K19+440(生物防护)的DCP曲线为例,本文采用Logistic曲线模型进行拟合:

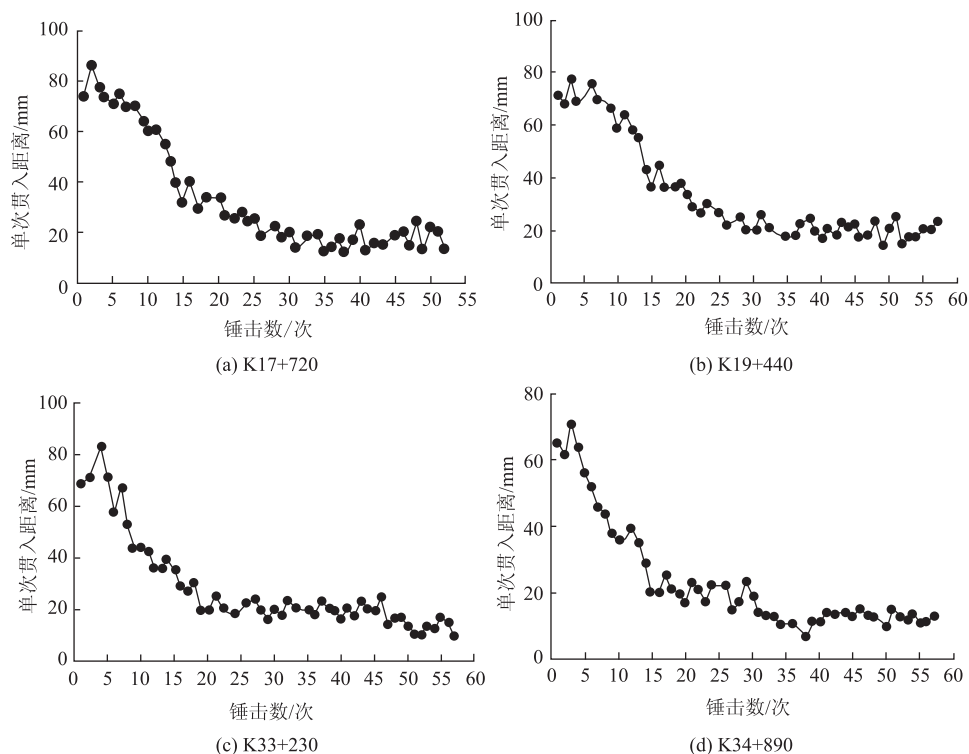


图 7 余凯边坡 DCP 曲线

Fig. 7 DCP curve of Yukai slope

$$f(x) = 762\,618\,440.026 / (1 + 9\,426\,460.093e^{0.037x}), \quad (1)$$

对方程求导, 计算得出拐点值:

$$f'(x) = 0, x_0 = 19.37. \quad (2)$$

当锤击次数达到第 20 次时对应的累计贯入深度 ($h = 1.143\text{ m}$) 即为该边坡的实际扰动深度。

根据以上方法, 对余凯、凯羊测试边坡的扰动深度进行了计算分析, 该地区不同防护类型红黏土边坡的最大扰动深度为 2.932 m , 最小扰动深度为 0.695 m , 平均值为 1.289 m 。

1.3 红黏土边坡浅层破坏典型模式

红黏土边坡浅层破坏与扰动土裂隙发育密切相关。从微观结构分析^[5], 土体在干缩过程中, 边坡不同部位的水分丧失是不均匀的。表面的水分丧失速度较快, 即土体表面的含水率最小, 产生的基质吸力最大, 引起土体的收缩也最大; 土体内部的水分丧失较慢, 其含水量相对较大, 产生的基质吸力较小, 引起的土体收缩也较小。红黏土边坡扰动深度范围内土体不均匀收缩变形是形成裂隙的根本原因。

当扰动深度较小时, 红黏土边坡主要以浅表层裂隙发育为主, 无明显贯通结构面, 此时边坡的破坏形式以剥落、冲沟、溜方为主。但是, 浅表层裂

隙为水分迁移提供了通道, 从而使得环境扰动深度进一步增加, 局部可能出现裂隙的连通和延伸, 从而形成主要的贯通裂隙。存在贯通裂隙的红黏土边坡破坏模式与一般土坡有明显差异, 裂缝的位置、深度往往决定了破坏面的形态和范围, 如图 8 所示。

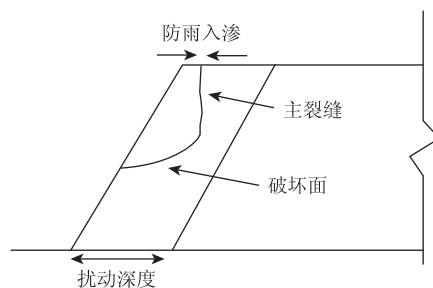


图 8 贯通裂隙红黏土边坡破坏模式

Fig. 8 Failure mode of slope with penetrating crack

由于贯穿裂隙的存在, 边坡的破坏面形态特征表现为上陡下缓, 破坏发生时坡体移动方向几乎沿着坡面向下坍塌, 现场的工程人员形象地称之为“坐”下来的。

在降雨入渗条件下, 雨水渗入并且充盈裂隙。一方面增加了土体容重, 降低了潜在滑动面上的抗滑力; 另一方面, 裂隙水产生的静水压力会对滑体产生推力作用。因此, 降雨入渗是红黏土边坡破坏的不利条件, 调研结果也显示红黏土边坡往往在暴

雨后出现集中的破坏。

2 红黏土边坡稳定评价方法

以简化 Bishop 法为代表的一般土质边坡稳定性分析方法将具有裂隙结构的红黏土边坡均质化,计算中采用室内或原位试验获取的强度参数,并将其视为边坡土体的整体强度参数。在此基础上,通过降低强度参数的大小来反映裂隙的影响,利用极限平衡方法进行边坡稳定性的分析^[6-10]。但是,从工程调研结果来看,该方法存在不合理性,主要有如下几点:(1) 圆弧滑动面假设与实际破坏形态不符,调研发现大部分红黏土边坡的实际破坏面呈现出上陡下缓的形态,破坏面后缘主要受土体中垂直裂隙的控制。(2) 通过均匀降低红黏土强度来体现裂隙对边坡稳定性的影响并不合理,它不能将裂隙的空间展布及裂隙面强度纳入计算考虑,即使将计算时采用的强度参数认为是裂隙面上的最低强度,也只有当滑动面位于裂隙面上时才符合实际。(3) 对降雨入渗的影响考虑不够充分,渗入裂隙的水除了增加土体重度,降低滑动面上的抗滑力以外,还对滑体本身有推力作用,如果忽略这一推力作用将使得计算出的安全系数偏于危险。

工程实践也表明,很多边坡虽然采用简化 Bishop 法验证了边坡稳定性,但后来仍然出现了坍塌破坏^[11-12]。这说明对红黏土边坡而言,一般土质边坡安全系数计算方法是偏于危险的。因此,本文根据红黏土边坡浅层破坏机理,提出能够客观反映裂隙影响的裂隙水压力推力平衡分析法。

首先,在红黏土边坡扰动土深度范围内设置贯穿的竖向裂缝(AB),下端连接的剪出面假设为圆弧滑动面(BC),采用条分法进行分析,土条间作用力仅考虑传递裂隙水的水平推力,如图9所示。

单一土条在 N_i 方向静力平衡为:

$$N_i = W_i \cos \theta_i; \quad (3)$$

滑动面上极限平衡为:

$$T_i = \frac{c_i L + W_i \cos \theta_i \tan \phi_i}{F_s}; \quad (4)$$

总体对圆心 O 的力矩平衡(1个)为:

$$M_z = M_R, \quad (5)$$

$$\sum W_i \sin \theta_i R + F_w d_w = \sum T_i R = \frac{\sum (c_i L_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi_i)}{F_s} R; \quad (6)$$

则安全系数的计算式为:

$$F_s = \frac{\sum (c_i L_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi_i)}{\sum W_i \sin \theta_i + F_w d_w / R}. \quad (7)$$

裂隙水柱静水压力对滑体产生推力 F_w 计算式为:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho g h^2. \quad (8)$$

以上各式中, N_i 为第 i 土条底面法向反力; W_i 为第 i 土条重力; θ_i 为第 i 土条底面倾角; T_i 为第 i 土条切向分力; c_i 及 ϕ_i 为强度指标; L 为滑动面长度; d_w 为裂隙水压力作用力矩; ρ 为水的密度; h 为裂隙深度; F_w 为裂隙水压力; F_s 为稳定安全系数。

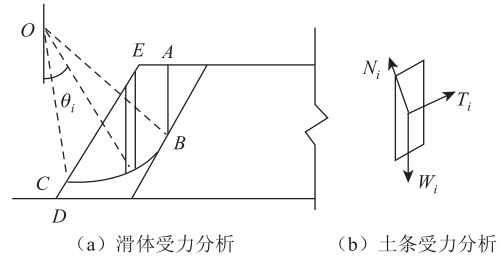


图9 水压力推力平衡法计算模式

Fig. 9 Calculation mode of water pressure equilibrium method

可采用试算法假定若干较危险的圆弧滑动面进行试算,取最小值作为最终的稳定安全系数。由于红黏土边坡扰动深度一般不超过 3 m,圆弧破坏面 BC 长度较短,因而也可以用直线(割线)近似表示。直线滑动面模式滑体受力平衡状态如图 10 所示,稳定安全系数计算表达式为:

$$F_s = \frac{(G \cos \alpha - F_w \sin \alpha) \tan \varphi + cL}{G \sin \alpha + F_w \cos \alpha}, \quad (9)$$

式中, G 为滑体的重量; α 为滑动方向与水平方向的夹角; L 为滑动面长度; T 为滑动面上的切向分力; c, φ 为土体强度参数。

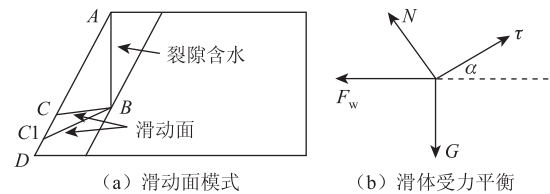


图10 直线滑动面计算模式

Fig. 10 Calculation mode of linear sliding surface

3 工程应用与验证

贵州余凯高速 11 标 FK+090 互通右侧边坡为二级边坡,一级坡高为 13 m,二级坡高为 5 m;坡率均为 1:1。该边坡 2013 年底开挖完成,开挖后没有

及时进行防护措施而导致坍塌破坏,清理后补做菱格窗式护面墙,于2014年上半年再次出现坍塌破坏(图11)。第二次坍塌后的边坡仍采用了清方后护面墙处治,并且对平台进行了封闭处理,目前边坡没有出现破坏,但是调研发现在一级平台的顶部出现了失稳裂缝,说明该边坡依旧存在失稳破坏的隐患。



图11 余凯FK+090边坡坍塌

Fig. 11 Collapse of a red clay slope in Yukai FK+090

分别采用简化Bishop法、裂隙水压力推力平衡法对该边坡的稳定安全性进行分析,计算得出边坡稳定安全系数如表1所示。从表中可以看出,简化Bishop法计算出的安全系数值为1.36;裂隙水压力推力平衡法计算出的安全系数值,采用直线滑动面假设时为1.03,采用圆弧滑动面假设时为1.08。由此可见,对红黏土边坡而言,裂隙是控制边坡稳定性的主要因素,本文提出的评价方法考虑了实际破坏模式中裂隙的影响,计算出的稳定安全系数更加能够反映边坡的实际稳定状态。从计算结果可知,裂隙水压力推力平衡法中下部滑面形态对分析结果的影响不大。

表1 不同方法计算出的边坡安全系数

Tab. 1 Safety factors calculated by different methods

分析方法	安全系数	备注
简化 Bishop 法	1.36	浸润面以上土体重度取为饱和重度 γ_s , c , φ 通过原状土干湿循环试验获得;
推力平 直线滑面	1.03	裂隙位置设置在坡顶,裂隙贯穿扰动深度范围
平衡法 圆弧滑面	1.08	

4 结论

通过本文研究,得出以下结论:

(1) 红黏土裂隙发育为水分的迁移提供了通道,使得浅表土体含水率受降雨及蒸发作用的影响非常剧烈;随着深度的增加,蒸发作用对含水率的影响逐步降低,土体含水率呈现逐步增大并且趋于稳定的规律;另外,土质变异对含水率也有影响;

(2) 红黏土边坡浅层土体含水率季节波动较为

明显,但是随着深度的增加,环境因素的影响逐步减弱,土体含水率主要受内在因素的控制;

(3) 坡面防护类型对浅层土体湿度场影响较大,骨架类及护面墙类防护能够有效减缓降雨及坡面水的影响,从而使得环境对边坡浅层土体的扰动程度明显减小;

(4) 红黏土边坡坡面 DCP 曲线变化规律符合“先快后慢”的 S 形过程;根据这一规律提出采用曲线拟合来确定扰动深度的方法;

(5) 简化 Bishop 法用于红黏土边坡稳定性评价存在不合理性,本文提出能够客观反映裂隙影响的裂隙水压力推力平衡分析法,并且在工程应用中进行验证。

参考文献:

References:

- [1] 孔令伟,郭爱国,赵颖文,等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (6): 727-732.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water Stability of Xiangjing Expansive Soils and Their Mechanical Effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (6): 727-732.
- [2] 廖世文. 膨胀土与铁路工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
LIAO Shi-wen. Expansive Soil and Railway Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.
- [3] 杨和平,张锐,郑健龙. 非饱和膨胀土总强度指标随饱和度变化规律 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (4): 58-62.
YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. Variation of the Total Shear Strength of Unsaturated Expansive Soils with Degree of Saturation [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (4): 58-62.
- [4] 曹志娇. 非饱和红黏土抗剪强度特性研究及其应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
CAO Zhi-jiao. Research of Shear Strength of Unsaturated Red Clay and Its Application [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [5] 夏元友,张亮亮. 考虑降雨入渗影响的边坡稳定性数值分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (10): 27-32.
XIA Yuan-you, ZHANG Liang-liang. Numerical Analysis on Highway Slope Stability Considering Rainfall Infiltration [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (10): 27-32.

(下转第88页)

- [9] 沈庆, 陈徐均. 系泊多浮体系统流固耦合和浮体间耦合动力分析 [J]. 中国造船, 2002, 43 (2): 81-84.
SHEN Qing, CHEN Xu-jun. Dynamic Analysis of a Mooring Multi-body System Coupled with Fluid and among Bodies [J]. Shipbuilding of China, 2002, 43 (2): 81-84.
- [10] 沈惠明, 赵德有, 罗志雍. 流固耦合振动问题的特征值解法 [J]. 大连理工大学学报, 1990, 30 (3): 369-372.
SHEN Hui-ming, ZHAO De-you, LUO Zhi-yong. Solution to Eigenvalues of Fluid-solid Coupling Vibration Problem [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1990, 30 (3): 369-372.
- [11] YASUZAWA Y, SAITO Y. Vibration Analysis of Stiffened Plate in Contact with Water Using Finite Elements and Boundary Elements [J]. Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects, 1993, 42 (86): 147-160.
- [12] 阎超, 于剑. CFD 模拟方法的发展成就与展望 [J]. 力学进展, 2011, 41 (5): 562-589.
YAN Chao, YU Jian. On the Achievements and Prospects for the Methods of Computational Fluid Dynamic [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41 (5): 562-589.
- [13] 杨吉新, 雷凡. 水下桥墩结构的振动分析 [J]. 世界桥梁, 2009, 3 (3): 40-42.
YANG Ji-xin, LEI Fan. Analysis of Vibration of Underwater Bridge Pier Structure [J]. World Bridges, 2009, 3 (3): 40-42.
- [14] 严开, 邹志利, 李献丽. 不同二阶绕射波浪力理论公式的结果互比 [J]. 工程力学, 2013, 30 (4): 31-37.
YAN Kai, ZOU Zhi-li, LI Xian-li. The Results Contrast with Different Theory Formula of Second-order Diffraction Wave Force [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (4): 31-37.
- [15] 居良国, 吕凤梧, 王彬. 波浪力作用下钢管桩施工平台随机动力响应分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3 (5): 70-74.
JU Gen-guo, LÜ Feng-wu, WANG Bin. Random Dynamic Response Analysis on Steel-pipe Pile Construction Platform Based on Wave Force [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3 (5): 70-74.

(上接第42页)

- [6] HO P G. The Prediction of Hydraulic Conductivity from Soil Moisture Suction Relationship B. SC [M]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1979.
- [7] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明, 等. 边坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (3): 313-317.
SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren, TANG Bo-ming, et al. Accuracy and Application Range of Imbalance Thrust Force Method for Slope Stability Analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (3): 313-317.
- [8] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (5): 141-161.
KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the Techniques for Special Soils and Slopes [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (5): 141-161.
- [9] SEGALINI A, GIANI G P, FERRERO A M. Geomechanical Studies on Slow Slope Movements in Parma Apennine [J]. Engineering Geology, 2009, (109): 31-44.
- [10] EVANS M E, WANG Y, RUTTER N, et al. Preliminary Magneto Stratigraphy of the Red Clay Underlying the Loess Sequence at Baoji, China [J]. Geophysical Research Letters, 1991, 18 (8): 1409-1412.
- [11] BODMAN G B, COLMAN E A. Moisture and Energy Conditions during Downward Entry of Water into Soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1944, 2 (8): 166-182.
- [12] 方薇, 杨果林. 武广客运专线红黏土变形特性的研究 [J]. 铁道工程学报, 2008 (9): 13-20.
FANG Wei, YANG Guo-lin. Research on the Red Clay Deformation Characteristics of Wuhan-Guangzhou Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008 (9): 13-20.