

黄丽华, 刘顺青. 考虑裂隙影响的红黏土边坡浅层稳定性分析[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 102–108. [HUANG Lihua, LIU Shunqing. Shallow Stability Analysis of Red Clay Slope Considering the Influence of Fissure[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(2): 102–108]

## 考虑裂隙影响的红黏土边坡浅层稳定性分析

黄丽华<sup>1</sup>, 刘顺青<sup>2</sup>

(1. 河西学院 土木工程学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100)

**摘要:** 通过室内直剪试验获取了现场含水率变化范围内坡体红黏土的抗剪强度及残余抗剪强度参数, 同时采用湿度系数结合现场探槽试验以及裂隙的统计资料综合确定了红黏土边坡的裂隙开展深度, 以此为基础采用二维有限元分析软件 Midas Soilworks 分析了考虑裂隙影响的红黏土边坡的浅层稳定性, 并将计算结果与不考虑裂隙时进行了对比。结果表明: 红黏土边坡在考虑裂隙影响时滑动面随含水率增大逐渐从深层向浅层转变, 并最终处于裂隙开展深度范围内; 红黏土边坡的浅层安全系数在坡体饱和之前, 下降最为明显; 与不考虑裂隙的红黏土边坡相比, 浅层稳定安全系数的绝对衰减率在 20.4% ~ 32.0% 变化。

**关键词:** 红黏土边坡; 含水率; 浅层稳定性; 裂隙; 大气影响深度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0102-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.14

## Shallow Stability Analysis of Red Clay Slope Considering the Influence of Fissure

HUANG Lihua<sup>1</sup>, LIU Shunqing<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

**Abstract:** The shear strength and residual shear strength parameters under different water contents of red clay are measured by direct shear tests. The depth of fissure of red clay slope is determined by using humidity coefficient, field grooving test and statistical data of fissures. The shallow stability of red clay slope considering the influence of fissure is analyzed by using the two-dimensional finite element analysis software Midas Soilworks. The computing results are compared with the shallow safety factor without considering fissures. The computing results indicate that the sliding surfaces of red clay slopes gradually change from deep to shallow with the increase of water contents, and finally the sliding surface is in the range of the depth of fissure. The shallow safety factor of the red clay slope is the most obvious before the saturation of the red clay. Compared with the red clay slopes without fissures, the absolute attenuation rate of the shallow safety factor is between 20.4% and 32.0%.

**Keywords:** Red clay slope; Water content; Shallow stability; Fissure; Atmospheric influence depth

收稿日期: 2021-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579119); 甘肃省高等学校创新基金项目(2021B-259)。

作者简介: 黄丽华(1986-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事边坡稳定性等方面的研究。

E-mail: 444508662@qq.com

通信作者: 刘顺青(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事边坡工程等方面的研究。

E-mail: sqljust@just.edu.cn

0 引言

随着我国各种工程建设向山区发展,许多地方会遇到红黏土边坡问题。红黏土一般情况下裂隙较发育,应区别于一般的黏土<sup>[1]</sup>,因此,红黏土边坡也应区别于普通的黏性土边坡。在广梧高速公路沿线地区,每当降雨时,红黏土边坡会出现不同程度的滑塌现象,可见,浅层含水率变化对红黏土边坡的稳定性具有显著影响。目前,国内不少学者研究了红黏土强度与含水率的关系,如陈议城等<sup>[2]</sup>采用无侧限试验分析研究了含水率对桂林红黏土的无侧限抗压强度及电阻率的影响;刘顺青、陈佳雨及陈鸿宾等<sup>[3-5]</sup>分析研究了含水率及干密度等因素对红黏土抗剪强度的影响;穆坤等<sup>[6]</sup>采用三轴与压缩试验研究了干湿循环条件下压实红黏土工程性状。

另一方面,降雨入渗对红黏土边坡稳定性的影响如何,国内也有很多学者开展这方面的研究。如李天宝等<sup>[7]</sup>基于西南地区某大型红黏土边坡,分析研究了暴雨对其稳定性的影响;张群等<sup>[8]</sup>通过室内降雨入渗试验分析研究了红黏土边坡滑体厚度的分布成因,结果表明短时间内的强降雨入渗深度是导致缓倾角浅层红黏土土质滑坡主要集中在1~5 m的原因。但关于裂隙对红黏土边坡稳定性影响的研究较少,而实际工程中红黏土边坡常常因为干湿循环作用,坡体中常常存在干缩裂隙。目前为止,大多学者开展了裂隙对其他类别边坡稳定性的影响<sup>[9-12]</sup>,然而裂隙开展后对红黏土边坡的稳定性影响如何还缺少系统研究。

本文以广梧高速沿线边坡的红黏土为对象,通过直剪类试验获取了现场含水率变化范围内坡体红黏土的抗剪强度及残余抗剪强度参数,同时采用湿度系数结合现场探槽试验以及裂隙的统计资料综合确定了红黏土边坡的裂隙开展深度,以此为基础构建考虑裂隙影响的稳定性分析方法,采用二维有限元分析软件Midas Soilworks分析了考虑裂隙影响的红黏土边坡的浅层稳定性。研究结果为红黏土边坡的设计及养护治理提供了参考依据。

1 试验土料及测试方法

1.1 试验土料的基本特征

试验所用红黏土的粒组成分及基本的物理力学指标分别如表1、2和图1所示。

表1 红黏土的粒组成分

Table 1 Grain size composition of red clay

含量/(%)	粒径/mm
2	>2
0.9	2~1
2.2	1~0.5
1.67	0.5~0.25
7.06	0.25~0.075
86.17	<0.075

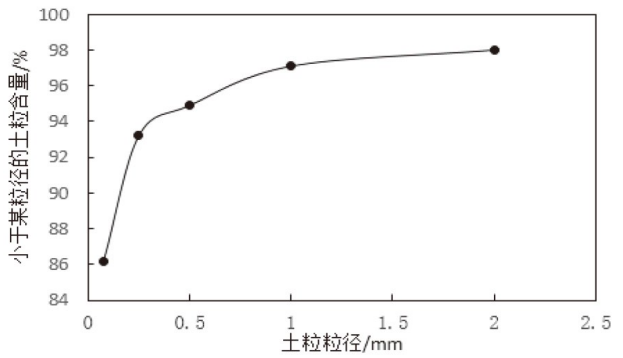


图1 红黏土的粒径分布图

Fig.1 Curve of particle size distribution of red clay

表2 红黏土物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical index of red clay

干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	天然含 水率/(%)	天然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	渗透系数 /(cm·s <sup>-1</sup> )	液限/ (%)	塑限/ (%)
1.53	25.5	1.92	2.86×10 <sup>-6</sup>	45.5	24.2

1.2 测试方法

为获得现场不同含水率下红黏土的强度指标,试验时制样干密度取1.53 g/cm<sup>3</sup>,分别按含水率10.3%、11.5%、13.8%、14.8%、16.8%、19.0%、20.6%、22.0%、23.0%、24.0%、25.7%、26.5%进行制样,每组试样4个,试验结果如表3所示。

1.3 试验结果分析

1.3.1 不同含水率下红黏土的黏聚力

红黏土的黏聚力与含水率的关系(图2)近似用指数函数表示为:

$$c=5818.5e^{-0.1924w}, 10\leq w\leq 27 \tag{1}$$

式(1)中,  $c$ 为黏聚力, kPa;  $w$ 为含水率, (%)。

1.3.2 不同含水率下红黏土的内摩擦角

红黏土的内摩擦角与含水率的关系(图3)近似

用分段函数表示为：

$$\varphi = \begin{cases} 50.5, & 10 \leq w < 20 \\ 1152.3e^{-0.1622w}, & 20 \leq w < 27 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中， $\varphi$ 为内摩擦角，( $^{\circ}$ )； $w$ 为含水率，(%)。

表 3 不同含水率下红黏土的强度指标

Table 3 Strength index of red clay under different water contents

干密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水率/ (%)	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
1.53	10.3	761	52
	11.5	535	51
	13.8	374	50
	14.8	349	50
	16.8	257	50
	19.0	205	50
	20.6	154	49
	22.0	112	30
	23.0	43	25
	24.0	42	23
	25.7	40	20
	26.5	38	15

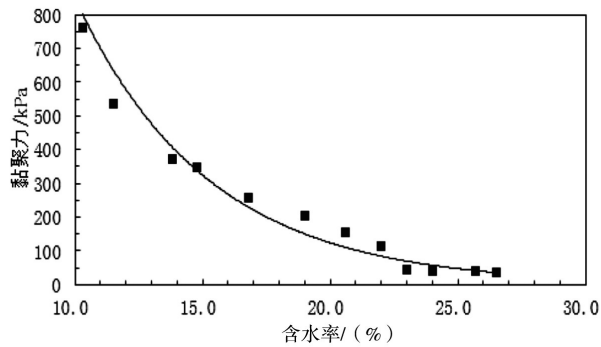


图 2 红黏土的黏聚力与含水率的关系曲线

Fig.2 Relationship between cohesion and water content of red clay

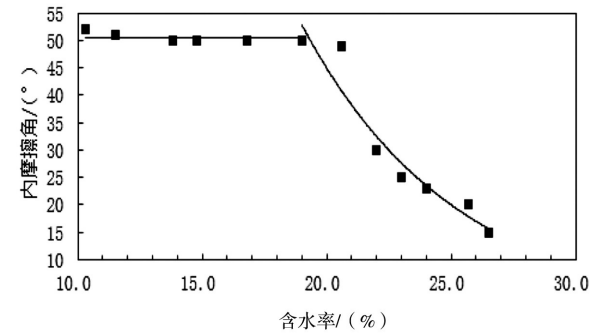


图 3 红黏土的内摩擦角与含水率的关系曲线

Fig.3 Relationship between internal friction angle and water content of red clay

2 红黏土边坡的大气影响深度

大气对土体湿度的影响深度称为大气影响深度<sup>[13-14]</sup>，本文采用红黏土的湿度系数来计算该影响深度。

从表2中可以看出，研究区的红黏土塑性指数大于17。通过试验测得其自由膨胀率为43%，

可见其具有一定的膨胀性。因此，可采用膨胀土规范中的湿度系数与大气影响深度的关系(表4)进行红黏土的大气影响深度计算。

表 4 大气影响深度

Table 4 Atmosphere influence depth

土的湿度系数 $\psi_w$	大气影响深度/m
0.6	5.0
0.7	4.0
0.8	3.5
0.9	3.0

土体湿度系数 $\psi_w$ 的公式如(3)所示：

$$\psi_w = \frac{w_{\min}}{w_p} \quad (3)$$

式(3)中， $w_{\min}$ 及 $w_p$ 分别为地表下1 m深度处土体含水率可能达到的最小值及土体塑限值。

通过现场探槽试验，获取了红黏土边坡后缘土体1 m深度处的4个方向的含水率，探槽试验分别在不同的月份进行，并将试验获得的4个含水率取平均，如表5所示。

表 5 1 m 深度处土体含水率

Table 5 Soil water contents at depth of 1 m

月份	红黏土边坡后缘1 m深处平均含水率(%)
3月	15.1
7月	25.4
9月	26.3
10月	24.9
11月	17.5
12月	14.6

通过式(3)计算红黏土的湿度系数：

$$\psi_w = \frac{w_{\min}}{w_p} = 0.603 \quad (4)$$

根据湿度系数并查表可得到红黏土边坡的大气影响深度约为5.0 m。本文中的红黏土渗透性较弱，大气影响深度下的降雨入渗深度是导致红黏

土边坡发生浅层滑动的主要原因。

3 考虑裂隙影响的红黏土边坡稳定性分析方法

3.1 区域划分

裂隙的存在与否对红黏土强度的影响很大，因此需分别考虑裂隙区与无裂隙区。在区别两个区域之前，首先需要确定裂隙的开展深度 $h_c$ 。肖荣久<sup>[15]</sup>通过对膨胀土中裂隙的观察统计得出裂隙的一般深度在2~6 m。在没有可靠探测资料时，根据上述统计资料并结合研究区红黏土边坡的大气影响深度，本文取 $h_c=5$  m。

本文将红黏土边坡土层分为3层，如图4中a、b、c所示。其中a层为裂隙充分发育土层，厚度近似取 $2/3h_c$ ，b层为裂隙未发育土层，厚度近似取 $1/3h_c$ ，c层为无裂隙土层。

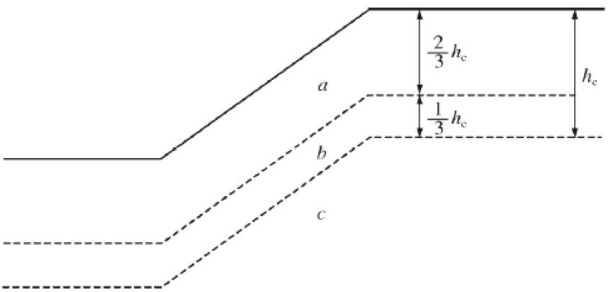


图4 红黏土边坡土层区域划分  
Fig.4 Soil zoning of red clay slope

3.2 划分区域强度指标的选取

红黏土边坡划分区域抗剪强度的指标选用如下：

- a区裂隙发育，取残余强度指标 $c_f$ 和 $\varphi_f$ ；
- b区裂隙发育不充分，处于过渡阶段，故可假定， $c_b=(c_o+c_f)/2$ ， $\varphi_b=(\varphi_o+\varphi_f)/2$ ；
- c区为无裂隙的原状红黏土，取 $c_o$ 和 $\varphi_o$ 。

本文通过反复直剪试验获得了红黏土的残余强度指标，如表6。

表6 不同含水率下红黏土的残余强度指标  
Table 6 Residual strength index of red clay under different water contents

起始干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	起始含水率/(%)	残余黏聚力/kPa	残余内摩擦角/(°)
1.53	10.3	266	36
	11.5	187	36
	13.8	131	35
	14.8	125	35
	16.8	86	35
	19.0	74	35
	20.6	52	34
	22.0	39	22
	23.0	16	18
	24.0	15	16
	25.7	14	15
	26.5	13	12

4 红黏土边坡浅层稳定性计算

4.1 计算模型的建立

高速公路现场红黏土边坡高度大多不超过25 m，因此本文建模时选取边坡高度为20 m、坡度为45°。基于二维有限元分析软件Midas Soilworks建立

的含裂隙影响的红黏土边坡有限元计算模型如图5所示。

4.2 本构模型与计算参数的选取

本文考虑裂隙影响时的红黏土边坡稳定性计算时本构模型选用摩尔—库仑模型。已有文献结果表明弹性模量和泊松比对边坡安全系数的影响不大<sup>[16-17]</sup>，稳定性计算时采用固结排水剪切试验得到



的值,弹性模量和泊松比分别取 10 Mpa 及 0.37。原状红黏土的现场天然含水率接近 25.7%,所以无裂隙区红黏土可取含水率为 25.7%时的强度参数。

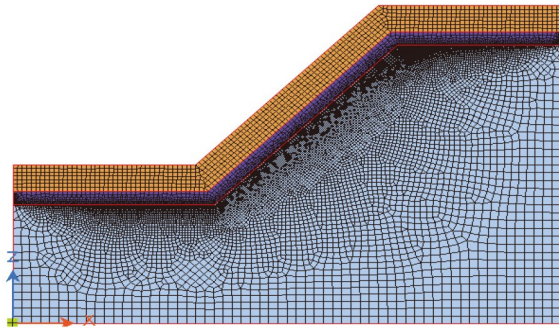
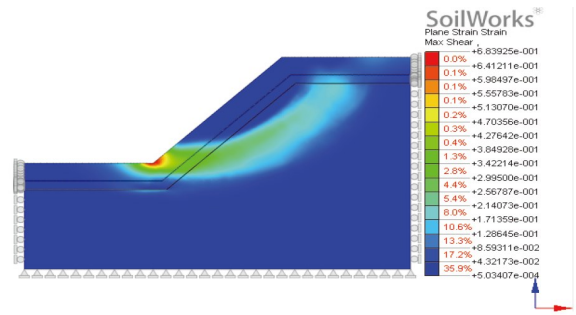


图5 考虑裂隙影响的红黏土边坡有限元计算模型图  
Fig.5 Finite element model and mesh generation of red clay slope considering the influence of fissure

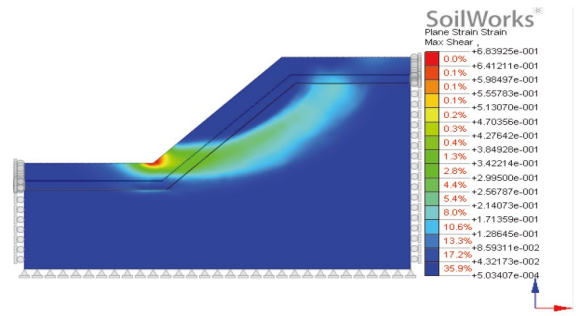
### 4.3 计算结果分析

#### 4.3.1 不同含水率下含裂隙红黏土边坡的变形特性

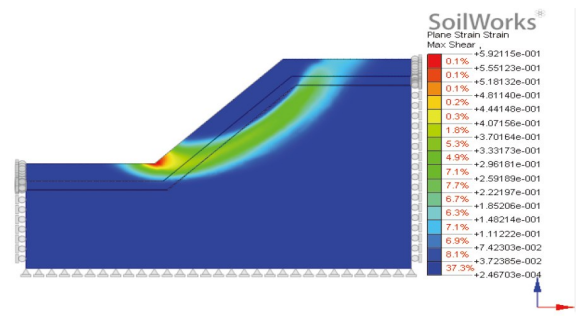
采用强度折减法对含裂隙影响的红黏土边坡的浅层稳定性进行了分析,得到了各含水率下含裂隙红黏土边坡的最大剪切应变云图(图6),由图可知,红黏土边坡在考虑裂隙影响时滑动面随含水率增大逐渐从深层向浅层转变,并最终处于裂隙开展深度范围内。通过与相对应的不考虑裂隙时边坡最大剪切应变云图对比可知,考虑裂隙影响后相同含水率下红黏土边坡的滑动面位置较浅。可见,裂隙的存在对红黏土边坡的浅层稳定性具有重要的影响。



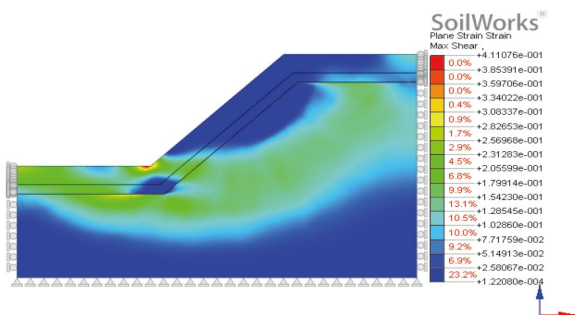
(c)含水率 16.8%



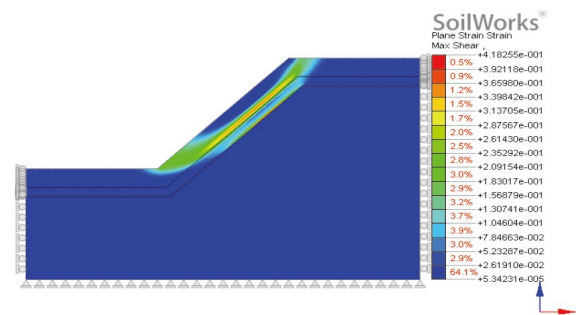
(d)含水率 19.0%



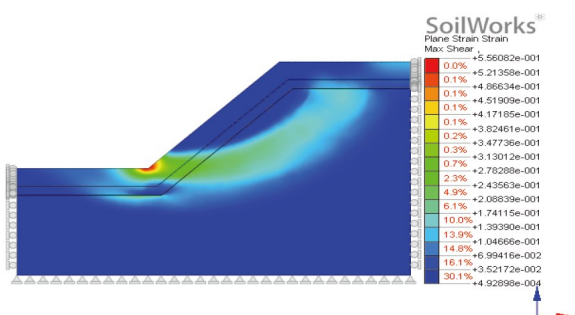
(e)含水率 22.0%



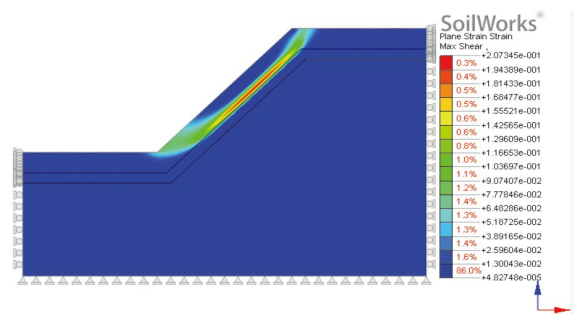
(a)含水率 10.3%



(f)含水率 24.0%



(b)含水率 14.8%



(g)含水率 26.5%

图6 不同含水率下含裂隙红黏土边坡最大剪切应变云图

Fig.6 Maximum shear strain contours of red clay slopes containing fissure under different water contents

#### 4.3.2 不同含水率下含裂隙红黏土边坡的浅层稳定安全系数

不同含水率下红黏土边坡的浅层稳定安全系数如图7所示。从图7中可以看出,当含裂隙红黏土边坡的含水率在10.3%~26.5%之间变化时,边坡的安全系数从2.512减小到了0.850,其中边坡的稳定安全系数在含水率10.3%~23.0%时下降最为明显,而后因土层接近饱和,所以降低不明显。红黏土边坡的安全系数产生上述变化的原因是红黏土中的胶结形式(游离氧化铁胶结)在含水率超过某值时发生了骤然破坏,从而导致安全系数的明显降低。

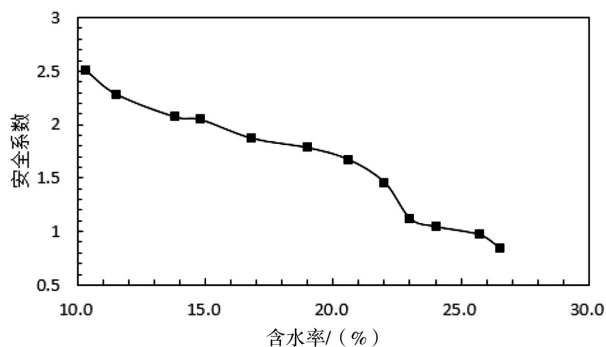


图7 不同含水率下含裂隙红黏土边坡的浅层安全系数  
Fig.7 Shallow safety factors of red clay slopes containing fissure under different water contents

### 5 裂隙对红黏土边坡浅层稳定安全系数绝对衰减率的影响分析

为定量分析裂隙的存在对红黏土边坡浅层稳定安全系数的影响,给出边坡浅层稳定安全系数绝对衰减率 $\Delta_i$ 定义:

$$\Delta_i = \frac{|F_i - F_0|}{F_0} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中, $F_i$ ,  $F_0$ 分别为相同含水率下考虑与不考虑裂隙影响时红黏土边坡的浅层稳定安全系数。

不考虑裂隙影响时红黏土边坡稳定性的计算结果如图8所示,此时稳定性计算时的模型与考虑裂隙影响时的模型一致,但大气影响深度范围内抗剪强度指标选用表3中各含水率对应的值。边坡安全系数的绝对衰减率如图9所示。从图中可看出,当含水率在10.3%~26.5%变化时,边坡浅层稳定安全系数的绝对衰减率在20.4%~32.0%变化,并在含水率为23%接近饱和时,达到最小值,裂隙的存在对其稳定性影响明显。对于广梧高速沿线的红黏土边坡发现裂缝应及时处理,防止红黏

土滑坡的发生。

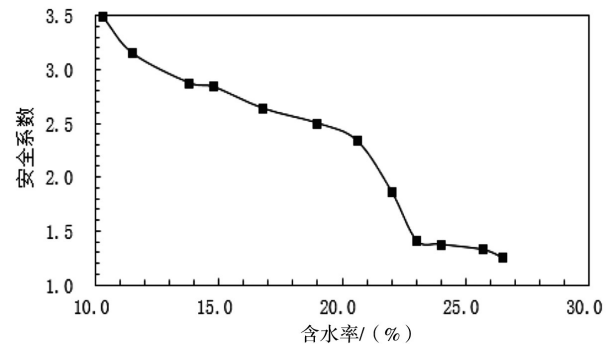


图8 不同含水率下不含裂隙时红黏土边坡浅层安全系数  
Fig.8 Shallow safety factors of red clay slopes without fissure under different water contents

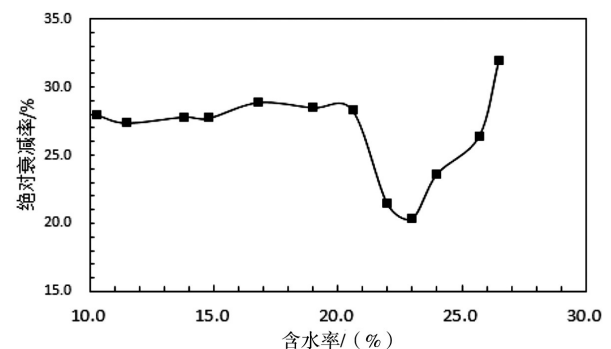


图9 不同含水率下红黏土边坡浅层安全系数的绝对衰减率  
Fig.9 Reduction ratio of shallow safety factors of red clay slopes under different water contents

### 6 结论

(1)采用湿度系数并结合现场探槽试验分析计算了研究区的大气影响深度,结合裂隙的统计资料综合确定了红黏土边坡的裂隙开展深度为5m。

(2)红黏土边坡在考虑裂隙影响时滑动面随含水率增大逐渐从深层向浅层转变,并最终处于裂隙开展深度范围内,红黏土边坡的浅层安全系数在坡体饱和之前,下降最为明显。

(3)与不考虑裂隙的红黏土边坡相比,浅层稳定安全系数的绝对衰减率在20.4%~32.0%变化。

#### 参考文献

- [1] 殷宗泽.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 陈议城,陈学军,吴迪,等.不同含水率下红黏土无侧限抗压强度与电阻率关系[J].桂林理工大学学报,2020,40(2):358-363.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 陈鸿宾,陈学军,齐运来,等.干密度与含水率对重塑红黏土抗剪强度参数影响研究[J].工程地质学报,2019,27(5):1035-1040.
- [6] 穆坤,孔令伟,张先伟,等.红黏土工程性状的干湿循环效应试验研究[J].岩土力学,2016,37(8):2247-2253.
- [7] 李天宝,许家培,刘开富.降雨及植被加固对红黏土边坡稳定性的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(6):1080-1084.
- [8] 张群,许强,易进松,等.南江红层地区缓倾角浅层土质滑坡降雨入渗深度与成因机理研究[J].岩土工程学报,2016,38(8):1447-1455.
- [9] 姚海林,郑少河,陈守义.考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2001,23(5):606-609.
- [10] 王志伟,王庚荪.裂隙性粘土边坡渐进性破坏的FLAC模拟[J].岩土力学,2005,26(10):1637-1640.
- [11] 殷宗泽,袁俊平,韦杰,等.论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J].岩土力学,2012,34(12):2155-2161.
- [12] 袁俊平,蔺彦玲,丁鹏,等.裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响[J].岩土工程学报,2016,38(1):76-82.
- [13] 余飞,陈善雄,许锡昌,等.合肥地区膨胀土路基处置深度问题探讨[J].岩土力学,2006,(11),1963-1966.
- [14] 王威,刘顺青,杨正玉,等.大气影响层含水率变化对下蜀土边坡稳定性的影响分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(4),19-24.
- [15] 肖荣久.陕南膨胀土及其灾害地质研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1995.
- [16] Giffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite element [J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387-403.
- [17] Cheng Y M, Lansivaara T, Wei W B. Two-dimensional slope stability by limit equilibrium and strength reduction methods [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 37(3):137-150.