

基于裂隙描述的膨胀土堑坡稳定性分析

李雄威¹, 代国忠¹, 于常瑶¹, 王继果²

(1. 常州工学院常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室, 江苏 常州 213002; 2. 三江学院土木工程学院, 江苏 南京 210012)

摘要:以广西白色强膨胀土为研究对象, 利用 MATLAB 软件编制程序对土体裂隙图片进行二值化处理, 获得裂隙率与含水率的线性回归关系。现场试验观测表明, 雨季前裂隙长期平均宽度 0.005 m, 利用等效模型, 获得表层土体含水率与裂隙间距的相关关系。按照雨水在裂隙中渗流的过程建立裂隙影响下的雨水入渗计算模型, 利用不同裂隙间距, 来描述裂隙分布。基于裂隙描述的雨水入渗膨胀土堑坡稳定性计算结果表明, 是否考虑裂隙对膨胀土边坡稳定性的计算结果影响较大。当裂隙率较高时边坡持续降雨后安全系数会大幅度降低, 同时边坡大气剧烈影响深度的加深也会引起安全系数的迅速降低。根据研究结果, 对膨胀土边坡治理提出了具体建议。

关键词:膨胀土; 堑坡; 裂隙; 大气作用; 稳定性分析

中图分类号: TU475.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)06-1069-07

作者简介:李雄威(1976-), 男, 湖北十堰人, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土力学、特殊土灾害预警和防治技术等方面的研究。E-mail: lixww@126.com。

Stability analysis of cut slope of expansive soil based on fissure description

LI Xiong-wei¹, DAI Guo-zhong¹, YU Chang-yao¹, WANG Ji-guo²

(1. Changzhou Key Lab of Structure Engineering and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;

2. College of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

Abstract: For the white strong expansive soil in Guangxi Zhuang Autonomous Region of China, by using the MATLAB software programming for binary processing of soil fissure images, a linear regression relationship between fissure ratio and water content is obtained. Field test observations show that the long-term average width of fissure is about 0.005 m before the rainy season. The correlation of the water content of surface soil and fracture spacing is obtained by means of the equivalent model. Using different fracture spacings, the fracture distribution is represented according to rainfall infiltration model in fracture seepage. Based on the description of fissures, it is shown that the calculated results of stability of cut slope with infiltration are deeply influenced by fissures. The safety factor of the slope decreases greatly with sustained rainfall when the fissure ratio is high, and it also greatly decreases with the development of the atmospheric drastic influence depth. According to the research results, some specific proposals are put forward for the cut slope of expansive soil.

Key words: expansive soil; cut slope; fissure; atmosphere action; stability analysis

0 引 言

膨胀土强度衰减现象一般认为源于膨胀土的裂隙性、超固结性和膨胀性。许多研究者在膨胀土堑坡稳定性问题的研究中, 均发现裂隙的存在及其发展变化对其边坡稳定有着重要的影响, 并注意到膨胀土边坡失稳时主要沿土体内的裂隙面或层理结构面滑动^[1]。气候影响下膨胀土反复胀缩的过程使得土体产生纵横交错的裂隙, 土体变得松散, 再加上风化作用, 进一步破坏了土体的完整性。这些裂隙网络又为雨水入渗和水分蒸发提供了良好的通道, 使得气候对土体的影响进一步向土体深部发展。这种气候影响深度一般在 1.5~2.0 m 左右, 最大深度可达 4 m。雨季时, 正是在

这一层浅层裂土中, 雨水下渗迅速, 并很快被土体大量吸收, 吸力骤降, 强度也随之骤降; 另外, 在气候影响深度以下, 土体裂隙不发育, 渗透性相对较低, 从而形成了相对不透水层。从上部入渗的雨水在此交界面汇集, 使得交界面处的土体很快达到饱和, 形成一层饱和软化带, 其强度随着降雨的发展逐渐降低, 一旦这种饱水软化带贯通, 就会形成浅层滑坡。工程实践和研究成果表明: 裂隙问题是膨胀土堑坡稳定的关键问题^[2-5], 裂隙的存在破坏了土体的整体性, 同时

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102229); 住房和城乡建设部科学技术项目(2012-k3-10); 江苏省“青蓝工程”资助项目

收稿日期: 2012-09-21

方便了水分的入渗和蒸发,天气变化时将导致裂隙进一步扩展和向土层深部发展;当含水率变化时,膨胀土会发生膨胀或收缩变形,随着干湿循环次数的增加,裂隙逐渐发育,土体结构趋于松散,土体强度逐渐衰减。可见,对于膨胀土,裂隙性是它内在的性质,而大气作用是诱因,使得膨胀土呈现出强度衰减的趋势。在大气与土壤之间的水分和能量交换过程中,膨胀土的工程性质逐渐发生改变,强度不断衰减,进而演化为膨胀土壅坡的灾变^[6-7]。

本文拟在室内试验和室外试验结果的基础上,以现场试验边坡为分析原型,考虑膨胀土湿热耦合性状的影响,基于膨胀土裂隙的描述,对膨胀土壅坡的灾变机理进行深入分析。

1 场地条件

试验场地位于广西南宁市郊外,当地属于亚热带季风气候,阳光充足,气候温和,雨量充沛,干湿季节分明。对原场地进行现场开挖,浅层有灰白色膨胀土分布,土体胀缩特性见表1,根据膨胀潜势等级判定标准,灰白色黏土为强膨胀土。

表1 膨胀土胀缩特性

Table 1 Swell-shrinking characteristics of expansive soil

土样	自由膨胀率/%	收缩系数	缩限/%	体缩率/%	50kPa膨胀率/%
灰白色膨胀土	98	0.44	19.5	20.4	-0.085

2 膨胀土的裂隙描述

在蒸发过程中,对不同含水率灰白色强膨胀土表面裂隙的开展状态进行现场实时拍照,记录裂隙的开展过程。图形依据现场比例尺裁剪为30 cm×30 cm实际尺寸。利用MATLAB软件编制程序,对土体裂隙图片进行二值化处理,处理过程如图1所示。

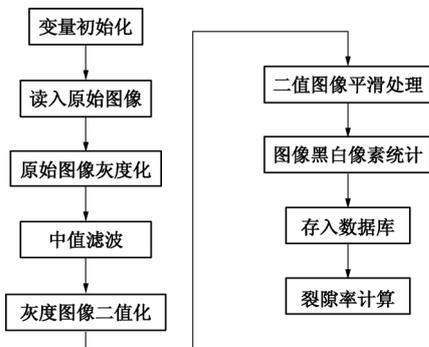


图1 裂隙率二值化处理程序框图

Fig. 1 Flowchart of binary processing of surface fissure ratio
经反复试算获取合理的分割阈值(或者二值化阈

值)滤波的处理精度和表面裂隙二值化图像分析的精度基本满足裂隙平面描述的要求。经对比观察,肉眼可见裂隙处理前后形状和分布一致。利用裂缝测宽仪测量对比,裂隙宽度实测值与二值化图像测量值,偏差在±0.1 mm内,基本满足对肉眼可见裂隙的描述。

本方法主要是对膨胀土表面裂隙进行客观描述,而裂隙深度可考虑用类似于渗透试验的间接方法获得。

不同含水率时,灰白色膨胀土表面裂隙的灰度图像经二值化处理后的结果见图2,图片中黑色像素代表裂隙,白色像素代表裂隙间土体。经过计算统计,不同含水率下土样的裂隙率见表2。

表面裂隙率 P (%) 的定义和计算方法为

$$P = (\text{土体表面裂隙面积} / \text{土体表面积}) \times 100\% = (\text{黑色像素数目} / \text{总像素数目}) \times 100\% = [\text{黑色像素数目} / (\text{黑色像素数目} + \text{白色像素数目})] \times 100\% \quad (1)$$

依据式(1),不同含水率时灰白色膨胀土表面裂隙率的计算结果见表2。

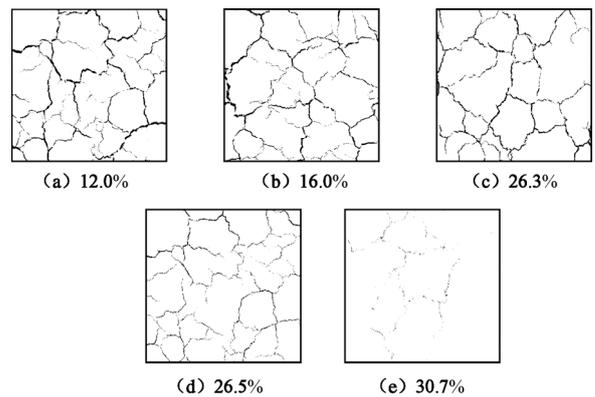


图2 不同含水率下灰白色膨胀土表面裂隙二值化图像

Fig. 2 Binary images of surface fissures of white expansive soil with different water contents

表2 不同含水率下土样的表面裂隙率

Table 2 Surface fissure ratio of soil samples with different water contents

土样含水率/%	黑像素/个	白像素/个	土样表面裂隙率/%
12.0	9815	555785	1.74
16.0	8544	569856	1.48
22.3	5924	546076	1.07
26.5	4148	557452	0.74
30.7	2296	568904	0.40

表2中的数据表明,不同含水率下,裂隙率和含水率成良好的线性关系。裂隙率与含水率的线性回归关系为

$$P = -0.071w + 2.6105 \quad (12.0 \leq w \leq 30.7) \quad (2)$$

式中, w 的单位为%。

3 考虑裂隙描述的膨胀土堑坡雨水入渗和稳定性计算分析

本文在裂隙描述的基础上进行边坡雨水入渗特性分析和稳定性计算, 采用湿热耦合非等温流方程, 结合实际降雨、蒸发的边界条件, 分析水分迁移引发的非饱和土强度变化状态, 建立大气-非饱和土相互作用模型, 进行相应计算; 并采用简化 Bishop 方法分析边坡的最终稳定性。雨水入渗分析中考虑了土体初始裂隙分布的影响, 水分渗透过程计算中考虑了非饱和土渗透性的变化过程及其对土体强度参数的影响。

计算软件采用的是 GEO-SLOPE 公司, GeoStudio 2004 中的 VADOSE/W 模块和 SLOPE/W 模块。

3.1 二维渗流计算中裂隙分布的模型

将现场试验中统计的表面裂隙分布, 基于裂隙率不变的前提, 按二维的形式等代为如图 3 所示的分布形式。依据现场试验观测的结果, 雨季前裂隙长期平均宽度为 5 mm, 则表层土体含水率与裂隙间距的关系见图 4, 可见含水率越高裂隙间距越大, 并呈现 $y = 0.1046e^{0.0747x}$ 的函数关系 (y 为裂隙间距 (m); x 为重力含水率 (%))。依据函数关系, 不同含水率下土体裂隙间距计算成果见表 3。

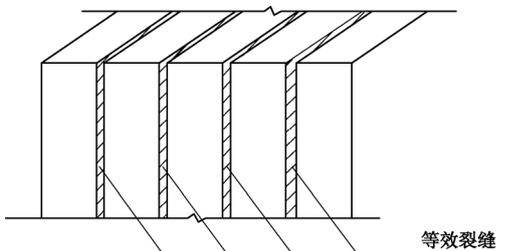


图 3 裂隙等效模型

Fig. 3 Equivalent model of fissures

表 3 不同重力含水率下裂隙率和裂隙间距

Table 3 Fissure ratio and fissure spacing with different gravitational water contents

地表土体重力含水率/%	裂隙率/%	土体裂隙间距/m
35	0.13	1.43
30	0.49	0.98
25	0.84	0.68
20	1.20	0.47
15	1.55	0.32

3.2 裂隙影响下的雨水入渗计算模型

膨胀土是典型的裂隙性土, 如果直接用室内试验中测得的土体渗透系数作为计算参数进行计算将会与裂隙土体的实际渗流过程产生较大差异, 在对裂隙土

渗流过程进行数值模拟时应该考虑裂隙的影响。

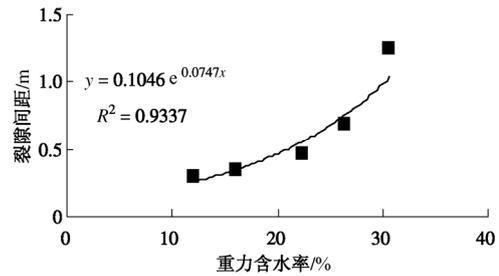


图 4 裂隙间距与重力含水率关系

Fig. 4 Relation between fissure spacing and gravitational water content

按照雨水在裂隙中渗流的过程建立模型, 如图 5 所示, 在降雨时, 雨水首先通过裂隙的路径进入土体, 在裂隙中充满水后, 土体表面和裂隙侧壁的水分开始渗入土体, 雨水在裂隙间土块的渗透完全符合非饱和土的渗透特性。基于裂隙影响下的雨水渗流计算模型既考虑了裂隙的影响又符合非饱和土力学理论, 适于对膨胀土边坡的降雨入渗过程进行计算分析。

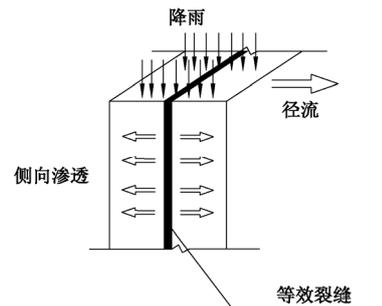


图 5 裂隙土雨水入渗计算模型

Fig. 5 Computational model of rainfall infiltration in fissures

3.3 计算模型和参数

(1) 计算模型

在降雨前期, 膨胀土边坡往往经历了不同的蒸发过程, 从而造成不同的地表裂隙分布。在分析不同蒸发历程引起的地表裂隙分布对膨胀土边坡稳定性的影响时, 用不同的等效裂隙间距来描述地表裂隙的分布。不同表层土体含水率, 即不同表层土体裂隙率下, 等效裂隙间距的取值见表 3。在经历降雨过程中, 基于裂隙影响下的雨水渗流计算模型, 假设降雨中裂隙处土体处于饱和状态。

现场试验结果表明新开挖膨胀土边坡剧烈影响深度为 0.5 m, 而经长期的相关监测结果表明, 膨胀土边坡的大气剧烈影响深度基本为 1.0~1.2 m 左右^[7], 考虑到新开挖膨胀土边坡的大气影响深度有一个逐渐加深的过程, 将计算中的裂隙深度分别取为 0.5, 1.0 m。

膨胀土边坡的计算依照文献[7]中坡1几何尺寸建立模型如图6所示。为了便于从土性上对边坡特性进行分析,本文计算中假设边坡土体分布均为灰白色膨胀土。现场试验发现,新开挖膨胀土边坡,地表土体含水率变化幅度较大,而在10 cm以下含水率变化幅度急剧降低^[7]。天然情况下,地表土体含水率较低时,按理论计算渗透系数较小,但由于地表土体受大气影响较大,风化程度高,土体松散,渗透性较大,不能完全按非饱和土理论定义渗透性。而且由于地下水位较高,水分供应充分。所以实际计算中,依然假设土体的吸力按静水压力线性分布。

计算中假设青灰色泥岩以下为不动层。土层工程地质条件分析结果表明下卧层中的青灰色粉细砂层呈饱和状态,吸力为零,假设该层以上土体的吸力按静水压力线性分布。边坡初始孔隙水压力分布见图7。

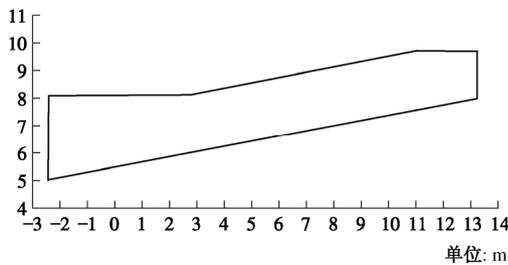


图6 边坡计算模型几何尺寸

Fig. 6 Geometric size of computational model for slopes

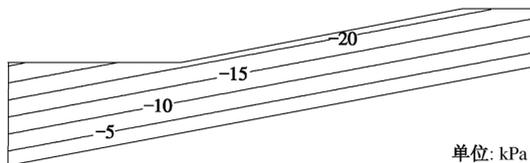


图7 边坡初始孔隙水压力分布

Fig. 7 Distribution of initial pore water pressure in slope

(2) 计算参数

灰白色膨胀土土体强度随着干湿循环的过程逐渐降低。为此,采用扰动膨胀土土样进行直剪试验,求得饱和强度参数 $c' = 0.7 \text{ kPa}$, $\varphi' = 18.7^\circ$, 对非饱和膨胀土土体吸附强度参数取 $\varphi^b = 9.3^\circ$ 。非饱和土强度公式为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (3)$$

土体的土水特征曲线见图8。渗透系数的取值考

表4 气象数据

Table 4 Meteorological data

日期	温度/		相对湿度/%		平均 风速 /(m·s ⁻¹)	总降 雨量 /mm	降雨 开始 时间/h	降雨 结束 时间/h	净辐 射量 /(MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	潜在 蒸发 量/mm
	最高	最优	最大	最小						
6月6日	24.22	22.71	99.99	99.99	0.36	54.8	1	24	2.64	0.05

虑干湿循环的影响^[8],非饱和土渗透曲线见图9。

现场监测数据表明,6~8月,计算范围内土体温度基本在25左右波动,所以假设土体初始温度均为25。计算中孔隙与大气连通,负孔隙水压力的绝对值即为基质吸力。计算中气候数据如表4所示,取6月6日的降雨条件。

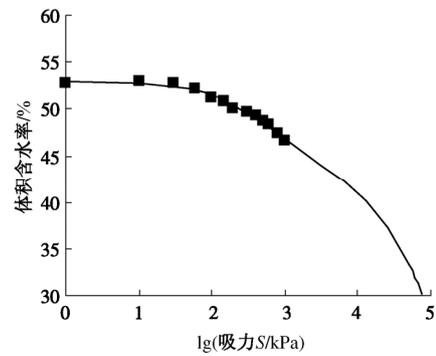


图8 校正后膨胀土土水特征曲线

Fig. 8 SWCC of white expansive soil

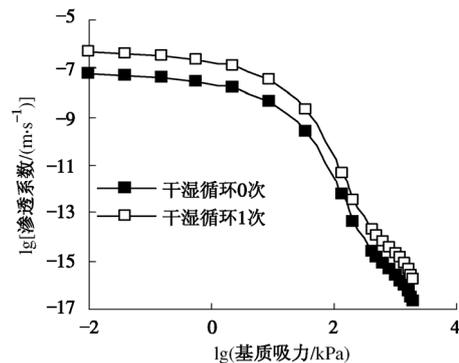


图9 非饱和膨胀土渗透系数函数^[8]

Fig. 9 Permeability coefficient function of unsaturated expansive soil^[8]

3.4 膨胀土堑坡雨水入渗计算结果分析

是否考虑裂隙、不同裂隙深度、不同表层裂隙率,降雨后边坡孔隙水压力分布的计算结果见图10。

可见,裂隙率较小时边坡孔隙水压力分布与无裂隙分布的情况接近。当裂隙率较大时,与无裂隙膨胀土边坡相比,土体水量变化会进一步向深部发展,1 m裂隙深度时孔隙水压力影响深度要大于0.5 m裂隙深度的情况。

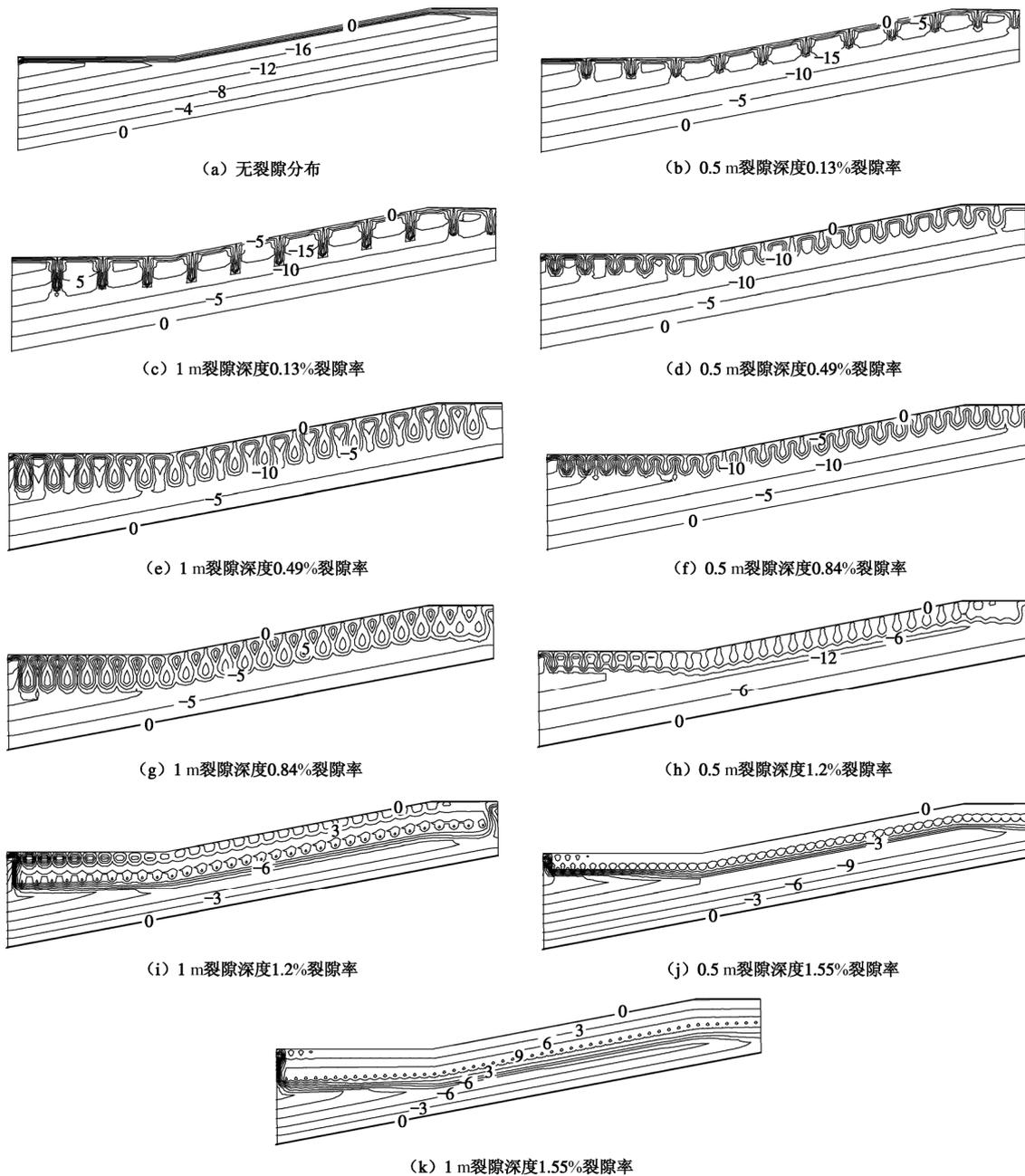


图 10 边坡孔隙水压力分布

Fig. 10 Distribution of pore water pressure in slope

Bishop 方法计算的膨胀土边坡最危险滑动面如图 11 所示。最危险滑动面的确定, 对应于安全系数计算的最小值。

由滑动面与裂隙率的关系可以看出, 随着裂隙率的变大, 滑动面逐渐趋于在浅层发生。在裂隙率超过 1.2% 后, 0.5 m 裂隙深度时滑动面深度在 0.5 m 内, 1 m 裂隙深度时滑动面深度在 1 m 内, 均在边坡强风化区内。

将不同裂隙率时膨胀土边坡的安全系数整理见表 5 和图 12。由于不考虑裂隙影响时, 裂隙率为零, 所以安全系数取值只有一个, 在图 12 中计算结果表现为两条曲线和一个点。

表 5 安全系数计算结果

Table 5 Calculated results of safety factor

裂隙计算深度/m	表层土体裂隙率%	Bishop 法
不考虑裂隙	—	2.941
0.5	0.13	2.884
	0.48	2.857
	0.84	2.815
	1.20	2.203
	1.55	1.553
1.0	0.13	2.878
	0.48	2.456
	0.84	1.921
	1.20	1.264
	1.55	1.137

由膨胀土边坡安全系数与裂隙率关系可以看出, 当裂隙率较小时, 膨胀土边坡在有无裂隙分布时的安

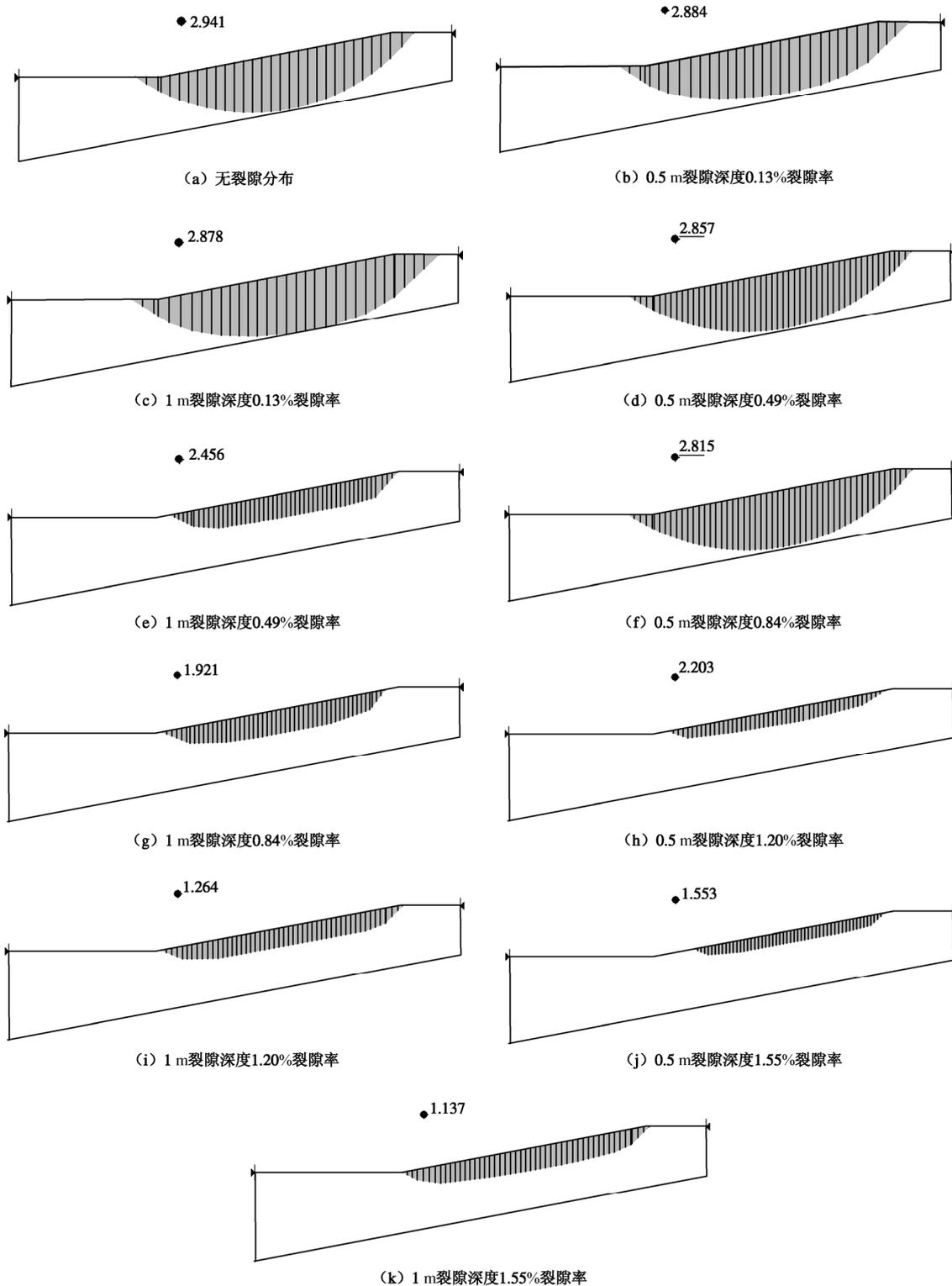


图 11 Bishop 方法下边坡最危险滑动面分布

Fig. 11 Most dangerous sliding surface of slope by Bishop's method

全系数相差不大。0.5 m 裂隙深度时，小裂隙率情况下边坡安全系数随裂隙率变化不大，当裂隙率大于 1.20%时，边坡安全系数随裂隙率的增大而迅速降低。1 m 裂隙深度时，边坡安全系数随裂隙率的增加而迅速降低，并在裂隙率大于 1.55%后边坡安全系数逐渐

趋于稳定。同时可见，裂隙深度为 1 m 时边坡安全系数在相同裂隙率时要远小于 0.5 m 裂隙深度的情况。

计算结果表明，考虑裂隙的存在，当裂隙率较高时边坡安全系数会大幅度降低，同时，边坡大气剧烈影响深度的加深也会引起安全系数的迅速降低。可见，当大气影响深度较大，前期蒸发作用剧烈时，降雨过

程会导致膨胀土边坡较大的变形, 边坡呈现最危险的状态。

所以, 在膨胀土边坡防护时要考虑防止雨水入渗, 避免浅层土体含水率迅速降低, 要采取措施降低边坡的大气影响深度, 阻止新开挖膨胀土边坡的大气影响深度向深处发展。

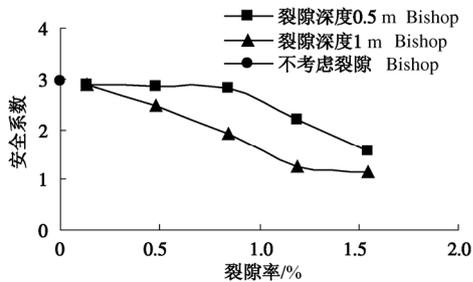


图 12 不同裂隙深度下边坡安全系数与裂隙率关系

Fig. 12 Relation between safety factor and fissure ratio at different fissure depths

4 结 语

考虑膨胀土边坡裂隙描述的雨水入渗数值计算结果表明, 是否考虑裂隙对膨胀土边坡稳定性的计算结果影响较大。当裂隙率较小时, 膨胀土边坡在有裂隙分布时的安全系数相差不大, 而当裂隙率较高时边坡安全系数会大幅度降低, 同时边坡大气剧烈影响深度的加深也会引起安全系数的迅速降低。可见, 当大气影响深度较大, 前期蒸发作用剧烈时, 降雨过程会导致膨胀土边坡较大的变形, 边坡呈现最危险的状态。所以在膨胀土边坡防护时要考虑防止雨水入渗, 避免浅层土体含水率迅速降低, 要采取措施降低膨胀土边坡的大气影响深度, 阻止新开挖膨胀土边坡的大气影响深度向深处发展。

本文基于裂隙描述对膨胀土堑坡的稳定性展开分析, 为认识堑坡灾变机理, 优化堑坡防护技术, 提供了一条将膨胀土裂隙性与堑坡稳定性相联系的有效途径。

致 谢: 感谢中国科学院武汉岩土力学研究所特殊土力学组给予的软件支持和计算帮助。

参考文献:

- [1] VOGEL H J, HOFFMANN H, ROTH K. Studies of crack dynamics in clay soil: I. Experimental methods, results, and morphological quantification[J]. Geoderma, 2005, **125**(3/4): 203 – 211.
- [2] 殷宗泽, 徐 彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 454 – 459. (YIN Zong-ze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 454 – 459. (in Chinese))
- [3] VOGEL H J, HOFFMANN H, ROTH K. Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation[J]. Geoderma, 2005, **125**(3/4): 213 – 223.
- [4] TABBAGH J, SAMOUËLIAN A, TABBAGH A, et al. Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterisation of cracks in soils[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, **62**(4): 313 – 323.
- [5] VELDE B. Structure of surface cracks in soil and muds[J]. Geoderma, 1999, **93**(1/2): 101 – 124.
- [6] PENG X, HORN R, PETH S, et al. Quantification of soil shrinkage in 2D by digital image processing of soil surface[J]. Soil & Tillage Research, 2006, **91**: 173 – 180.
- [7] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土堑坡变形的湿热耦合效应及其与降雨历时的关系[J]. 公路交通科技, 2009(7): 1 – 6. (LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Moisture-heat coupling effect of expansive soil cut slope deformation and relationship between deformation and raining time[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009(7): 1 – 6. (in Chinese))
- [8] 李雄威, 张鹤年, 张 勇. 膨胀土渗透性室内试验与非饱和和渗透系数预测[J]. 四川建筑科学研究, 2011(5): 115 – 118. (LI Xiong-wei, ZHANG He-nian, ZHANG Yong. Lab test and unsaturated coefficient prediction of expansive soil permeability[J]. Sichuan Building Science, 2011(5): 115 – 118. (in Chinese))