

文章编号: 1006 - 2106(2018) 08 - 0038 - 06

基于改进极限平衡法的非饱和边坡稳定分析*

刘勇**

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 研究目的: 极限平衡法是非饱和土边坡稳定分析最为常见的方法之一, 但由于降雨入渗时边坡的渗流场是瞬态的, 这导致很多工程在使用极限平衡法进行边坡稳定分析时常常使用了错误的有效应力及剪切强度。本文以合福铁路古田北站的非饱和土边坡为研究对象, 在改进极限平衡法、室内试验及数值模拟的基础上进行降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的影响规律研究。

研究结论: (1) 降雨量、降雨频率、降雨时间与非饱和土边坡的瞬态渗流场、有效应力场及边坡稳定安全系数密切相关; (2) 通过计算确定古田北站非饱和土边坡失稳发生在5月份, 这与边坡实际失稳的时间吻合; 计算确定的边坡滑移位置与边坡实际滑移位置也相同; (3) 数值分析结果表明, 采用改进的极限平衡法来预测非饱和土边坡的稳定性是有效的, 可以作为施工方案的依据。

关键词: 改进极限平衡法; 基质吸力; 稳定性; 非饱和土边坡

中图分类号: U213.1+3 **文献标识码:** A

Study on Stability of Unsaturated Soil Slope under Rainfall Based on Improved Limit Equilibrium Method

LIU Yong

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd , Wuhan , Hubei 430063 , China)

Abstract: Research purposes: Limit equilibrium method is one of the most common methods of unsaturated soil slope stability analysis. The transient seepage field was generated due to rainfall infiltration. The wrong effective stress and shear strength was used in many engineers. In this paper , taking unsaturated soil slope of Gutian North station of Hefei - Fuzhou railway as the research object , based on improved limit equilibrium method , laboratory test and numerical simulation , the law of stability of unsaturated soil slope under rainfall was studied.

Research conclusions: (1) The rainfall capacity , rainfall frequency and rainfall time were closely related to transient seepage field , effective stress field and safety factor of slope stability. (2) The calculations determined failure time was May. The result was accordance to project site. The failure location was unanimous to project site. (3) The improved limit equilibrium method is effective to predict the slope stability. The results can be used as the basis of engineering change.

Key words: improved limit equilibrium method; matric suction; stability; saturated soil slope

1 工程概况

边坡位于古田县最南端的黄田镇洋上村, 距古田县城约 17 km。北站范围内有两条较大河流——香峰

溪和保洋溪, 其中香峰溪与铁路平行, 保洋溪与铁路垂直。为了避免占压香峰溪河道, 铁路沿半山坡往前延伸, 路基地段位于陡峭的斜坡上, 施工难度非常大。其中 DK 731 + 755 ~ DK 731 + 465 段为高挖方路堑边

* 收稿日期: 2018 - 06 - 26

** 作者简介: 刘勇, 1978 年出生, 男, 高级工程师。

坡最大高度达 85 m。边坡位置处于河道旁的山坡上,平时不临水,一旦受洪水和降雨的影响,就是高水位,是典型的非饱和土边坡。通过钻孔资料可知,上层残积土结构较松散,为主要含水层,直接受降雨影响,地表水下渗快,底板为凝灰岩全风化层,弱透水。孔隙水下渗至基岩风化层面后形成富水带,主要受表水和坡积层含水层补给,一般含水量较小,土体基本饱和。基岩裂隙水埋藏较深,补给来源宽广,往往在陡坡与缓坡交界处,以泉水形式出露,部分渗流至下方坡残积体内,成为孔隙水主要补给来源之一。

右侧路堑加固措施: DK 731 + 755 ~ DK 731 + 465 段,边坡分为 7 级,每级边坡高度不大于 10 m,平台宽度为 3.0 m,边坡均采用框架锚杆结合基材植生进行防护;边坡平台设置截水沟,路堑边坡除骨架护坡外,每隔 10 m 设一条混凝土预制排水槽,堑顶外设置排水天沟。在没有考虑降雨影响的情况下,通过极限平衡法进行验算,验算结果表明边坡的稳定性系数满足要求。受连续强降雨影响,2013 年 5 月 4 日施工单位人员发现该段路基右侧边坡下滑,框架梁被拉裂,经现场实地查看,DK 731 + 755 ~ DK 731 + 465 段边坡及路堑堑顶山体下滑严重,接近坡顶处有两条贯通裂缝,缝宽约 20 ~ 30 cm,路堑右侧堑顶山坡坡面裂缝开裂成环,滑动体斜长约 160 m,宽度约 70 m;边坡向线路中线方向水平位移近 60 cm,边坡框架梁和平台开裂隆起;锚固桩未见开裂及位移。

极限平衡法是目前在边坡稳定性验算中使用最为广泛的方法。通过将滑动土体分成若干土条,分析作用于土条上的力来建立平衡方程^[1-4]。根据简化假设的不同,可以分为瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstem 法等。当前,很多研究都是假设滑移面的孔隙水压为零或为正^[5]。实际上,在降雨作用下,边坡的渗流场是瞬态的,作用在滑移面上的孔隙水压可能是负值^[6]。这就导致在边坡稳定分析时使用了错误的有效应力及剪切强度。

本文在改进极限平衡法、室内试验及数值模拟的基础上,对合福铁路古田北站的非饱和土边坡滑移面稳定性的演化规律进行研究,并对路基边坡病害原因进行探讨,从而为后期边坡的支护方案及防患边坡失稳提供工程计算依据。

2 改进极限平衡法

2.1 边坡瞬态不饱和渗流场

L. A. Richards^[7] 提出,考虑降雨入渗瞬态含水率的基本方程为

$$\nabla \cdot k(h) \nabla H = \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} \quad (1)$$

式中 h ——基质水头;
 H ——总水头;
 $k(h)$ ——渗透系数函数(HCF);
 $\theta(h)$ ——水土特征曲线(SWRC)。

为了求解方程(1) $k(h)$ 、 $\theta(h)$ 必须明确。本文采用 M. T. Van Genuchten 所提出的拟合公式,如式(2)、式(3),来确定渗透系数函数及水土特征曲线。

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1 - \frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$k = k_s \frac{\{ [1 - \alpha(u_a - u_w)]^{n-1} [1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n]^{n-1} \}^2}{\{ 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \}^{\frac{1}{2} - \frac{n}{2}}} \quad (3)$$

式中 u_a ——孔隙空气压力;
 u_w ——孔隙水压力;
 θ_r ——残余状态含水率;
 θ_s ——饱和状态含水率;
 α ——进气口空气吸力的倒数;
 n ——孔隙尺寸参数;
 k_s ——饱和含水率。

α 、 n 可以通过水土特征曲线用 Van Genuchten^[8] 方程拟合得出。

2.2 边坡有效应力场

边坡在不同时间下的总应力场如式(4)所示。

$$\nabla \cdot \sigma + \frac{r}{g} b = 0 \quad (4)$$

式中 σ ——应力张量;
 b ——体积力向量;
 r ——不同饱和度下的土体重度;
 g ——重力加速度。

考虑基质吸力的有效应力场如式(5)所示。

$$\sigma' = \sigma - u_a - \sigma^s \quad (5)$$

式中 σ^s 为基质压力特征曲线引入基质吸力 $u_a - u_w$, σ^s 可以用方程(6)表示:

$$\begin{aligned} \sigma^s &= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (u_a - u_w) \\ &= - (u_a - u_w) \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1 - \frac{1}{n}} \quad (6) \end{aligned}$$

2.3 边坡稳定安全系数

将基质吸力代入有效应力库仑 - 摩尔定律中,考虑基质吸力的非饱和边坡的强度准则如方程(7)所示。

$$\begin{aligned} \tau_f &= c' + \sigma' \tan \varphi' \\ &= c' + \left\{ (\sigma - u_a) + \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (u_a - u_w) \right\} \tan \varphi' \quad (7) \end{aligned}$$

使用极限平衡法确定的边坡安全系数可以用方程(8)表示:

$$FOS = \frac{\sum_i (\tau_f l_{base})_i}{\sum_i (\tau l_{base})_i} = \frac{\sum_i [(c' + \sigma' \tan \varphi) l_{base}]_i}{\sum_i (\tau l_{base})_i} \quad (8)$$

式中 i ——条分数;

l_{base} ——条分块的宽度;

τ_f ——随着基质吸力的变化而变化的抗剪强度;

τ ——滑移面的抗剪强度,对于古田北站非饱和土边坡 τ 为黏土与弱风化凝灰岩交界面

处的抗剪强度。

3 试验

3.1 现场取样

在边坡的上、中、下分别设置3个取样点,用铁锹向下挖0.5 m的深坑后,在坑底用取样器取样。取样结束后,把所有的土样混合,在室内进行基本物理性质试验,试验结果如表1所示。

表1 土样的基本物理性质及抗剪强度参数

试样	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度 /(g/cm ³)	最优含水率 /%	孔隙率	c' /kPa	φ /(°)
黏土	28.8	13.6	15.2	1.65	22.1	0.36	6	35.1

3.2 三轴固结不排水试验

边坡稳定强度准则中的有效内聚力及有效内摩擦角通过三轴固结排水试验确定。主要的试验步骤如下:第一步,首先将试样完全饱和;第二步,围压分别设置为100 kPa、200 kPa、300 kPa;第三步,剪切速率为0.2%轴向应变的情况下进行CU剪切。

试验得到的轴向应变与偏应力的关系曲线如图1所示。从图1中可以看出,试样的破坏形式属于应力硬化型。随着轴向围压的增加,偏应力也随之增加。平均主应力与孔隙水压的关系曲线如图2所示。从图2中可以看出,在开始阶段孔隙水压出现负值,这是由于在加载的初始阶段存在冲击载荷的作用,产生超孔隙水压,随着试验的进行,超孔隙水压逐渐消散,孔隙水压的数值从负值逐渐过渡到正值,而且随着围压的增大,孔隙水压的数值逐渐增大。

根据偏应力及孔隙水压的数值计算饱和状态下的有效应力,在不同围压下的有效应力的基础上画出摩尔圆,最终确定土样的抗剪参数,如表1所示。边坡土体的有效内聚力为6 kPa,在饱和状态下有效内聚力的理论值为0 kPa,试验误差较小,试验数据可信度较高。有效内摩擦角为35.1°。

3.3 水土特征曲线试验

基质吸力与饱和度的关系通过试验确定。基于试验数据,通过Van Genuchten模型对水土特征曲线(SWRC)的数值进行拟合,得到反映非饱和和水土特征的两个重要参数,如图3所示。由方程3画出基质吸力与渗透系数的关系曲线,如图4所示。

从图3中可以看出,随着饱和度的升高,基质吸力的数值变化较大。从图4中可以看出,随着基质吸力的增加,土体的相对渗透系数减小。这说明由于土体

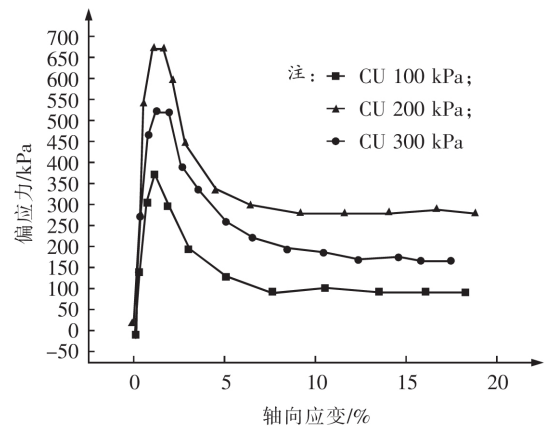


图1 轴向应变与偏应力的关系曲线

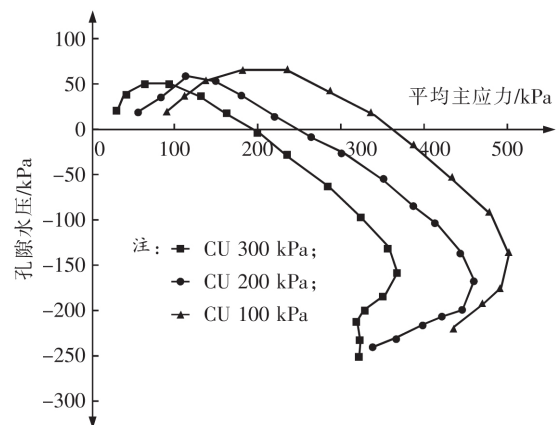


图2 平均应力与孔隙水压关系曲线

中基质吸力的存在,水流在土体中迁移速度变慢,而基质吸力与饱和度又有很大的相关性,因此在不同的饱和度下水在土体中的入渗速度是不一样的。如果知道每个月降雨量的平均值,就可以知道水在土坡中的入渗速度,就可以明确水对边坡稳定的影响规律。

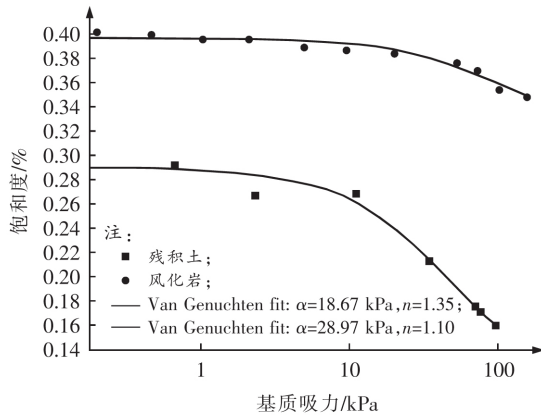


图 3 基质吸力与饱和度的关系曲线

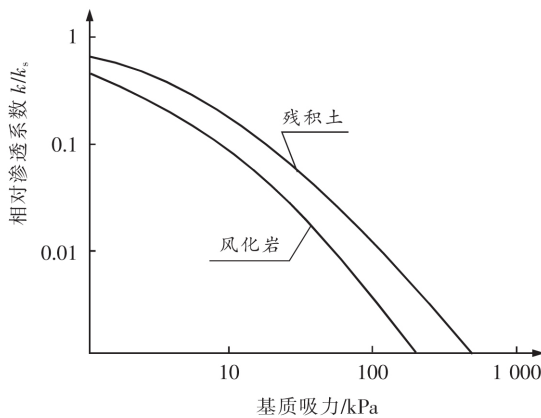


图 4 基质吸力与渗透系数的关系曲线

4 数值模拟

4.1 数值方法

边坡稳定性计算使用有限单元法,包括三个迭代过程:一是计算瞬态渗流场;二是计算边坡的有效应力场;三是在明确滑移面的基础上计算边坡稳定安全系数。三个计算过程都是由 GeoStudio2007 来实现的。用 SEEP/W 根据方程(1)来实现瞬态渗流场,用 SIGMA/W 根据方程(4)、方程(5)来实现有效应力场的计算,用 SLOPE/W 根据方程(8)来计算边坡稳定安全系数。

4.2 计算模型

以古田北站 DK 731 + 755 ~ DK 731 + 465 段高挖方路堑边坡作为本次研究的模型基础,其尺寸为:长 252 m,上面高 92 m。该模型上部为均质土坡,中部为弱风化凝灰岩,下部为未风化凝灰岩。假设边坡的滑移面在黏土与弱风化凝灰岩的胶结处。边坡的坡面由 GPS 测试数据导入,黏土与弱风化凝灰岩的交界面来

源于钻孔数据,计算模型如图 5 所示,模型分为 38 583 个节点,38 514 个单元。

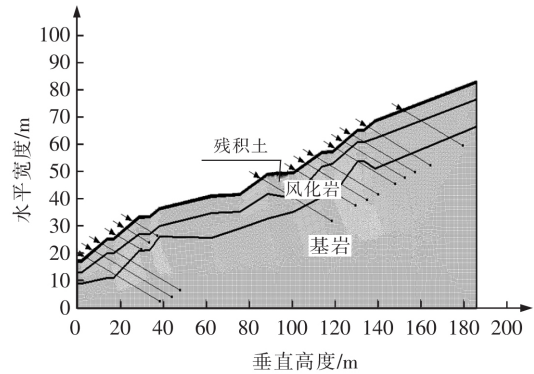


图 5 计算模型

4.3 边界条件

边坡的上表面使用通量边界条件来模拟降雨入渗。室内试验测定的水土特征曲线(SWRC)及渗透系数函数(HCF)被用来计算黏土层的孔隙水压力。由于未风化凝灰岩的水土特征曲线,假设未风化凝灰岩和风化凝灰岩非饱和参数相同。坡面的流体力学边界条件与每个月的降雨量有关。因为古田北站的降雨资料不完备,本文选用福建省 2013 年 1 月 ~ 12 月的降雨量,如图 6 所示,作为此次计算的初始边界条件。以降雨入渗瞬态孔隙压力场为基础计算有效应力场。边界条件为底部及两侧固定约束。边坡稳定性系数的计算以有效应力场为基础,滑移面采用 Morgenstern - Price 准则在残积土和风化岩界面及风化岩界面和未风化岩界面进行搜索。

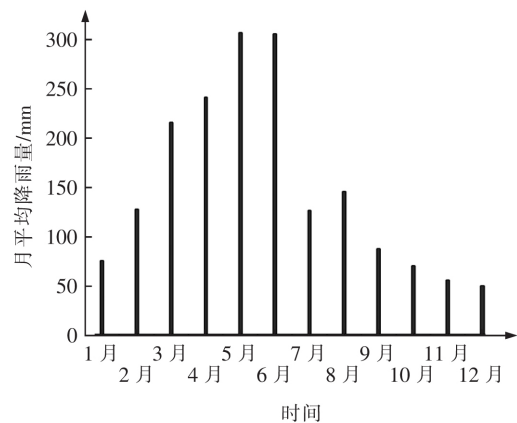


图 6 降雨量与时间的关系图

4.4 岩土及流体力学参数的选取

模型参数参照室内试验结果,模型的工程岩土及流体力学参数如表 2 所示。

表2 工程岩土及流体力学参数

类型	参数	黏土	风化凝灰岩
强度	c'/kPa	6	600
	$\varphi/(\text{°})$	35.1	45
	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	17.24	22
变形	E/kPa	2×10^6	5×10^6
	ν	0.333	0.333
流体力学参数	$k_s/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	1.3×10^{-7}	1.3×10^{-7}
	θ_s	0.327	0.41
	θ_r	0	0.12
	α	18.67	28.97
	n	1.35	1.1

4.5 计算结果分析

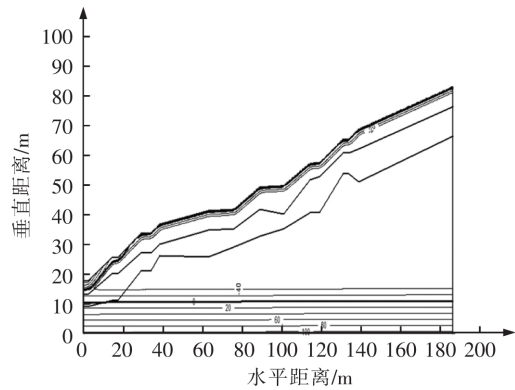
求得边坡稳定安全系数之前,降雨入渗导致的非饱和和渗流场必须明确。2013年12月的降雨量为49.3mm。图7(a)为降雨入渗引起的边坡孔隙压力场,从图中可以看出,地下水位以上孔隙压力自0kPa减小到-20kPa。这说明12月份的降雨边坡上的残积土及风化凝灰岩都没有饱和。

2013年5月是本年度降雨最多的月份。暴雨引起的边坡瞬态孔隙压力场如图8(a)所示。2013年5月累计的降雨量为306.7mm。从图8(a)可以看出,孔隙水压为零的水线在边坡上快速上升。残积土层的孔隙水压基本上为零。这说明残积土层在暴雨的作用下已完全饱和,边坡失稳的时间为2013年5月4日,这与边坡的实际失稳时间相吻合。

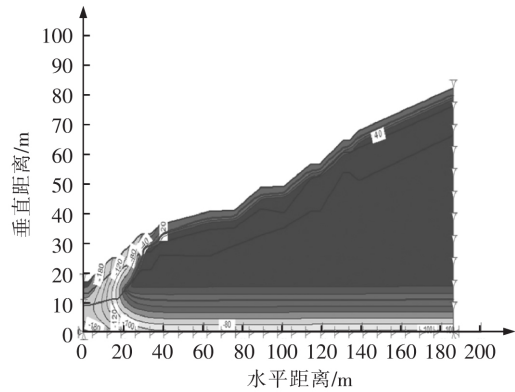
2013年12月及2013年5月,由孔隙水压的不同而引起的有效应力场也不同。相对2013年12月的有效应力场,2013年5月有效应力的范围及数值更大。这也进一步证明了2013年5月份边坡更加容易发生失稳。

边坡稳定安全系数是在瞬态孔隙水压场及有效应力场的基础上确定的。古田北站非饱和土边坡是高边坡,由施工削坡而产生7级边坡。计算安全系数时对7级边坡在残积土与风化凝灰岩及风化凝灰岩与基岩的界面进行搜索。计算结果中取最小值作为边坡稳定的安全系数。安全系数的搜索过程如图7(c)、图8(c)所示。从图7(c)、图8(c)可以看出,降雨量不同,边坡稳定安全系数最小值的位置不同。2013年12月安全系数的最小值出现在边坡的下部,容易在风化凝灰岩及基岩界面处出现滑坡。2013年5月边坡稳定安全系数出现在边坡的上部,失稳的位置在残积土与风化凝灰岩的界面处。危险滑移面稳定安全系数如图7(d)、图8(d)所示。从图7(d)、图8(d)可以看出,2013年12月边坡稳定安全系数为1.764,这时边坡处于稳定状态,边坡支护的预应力锚索处于工作状态,没有失效。2013年5月边坡稳定安全系数为0.853,这时边坡

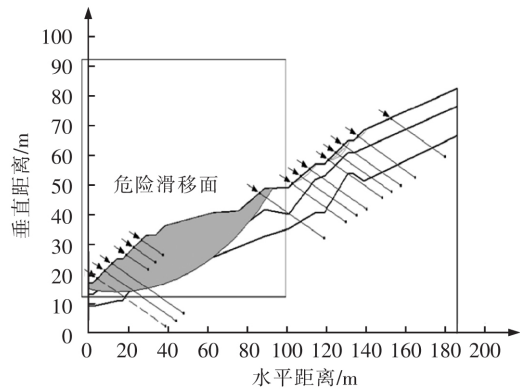
处于失稳状态,边坡的预应力锚索已经处于失效状态。



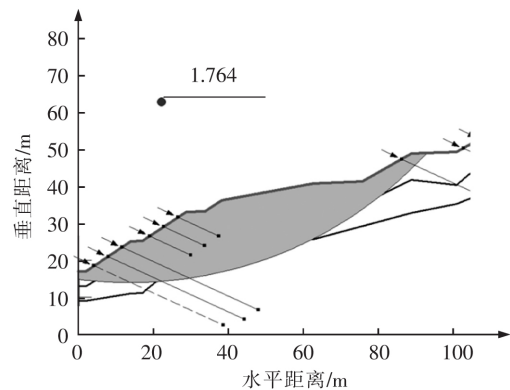
(a) 孔隙压力场



(b) 有效应力场

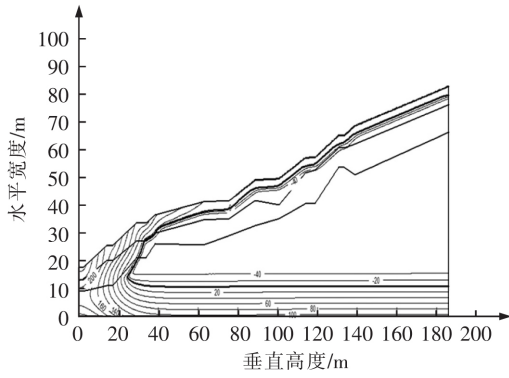


(c) 危险滑移面的搜索过程

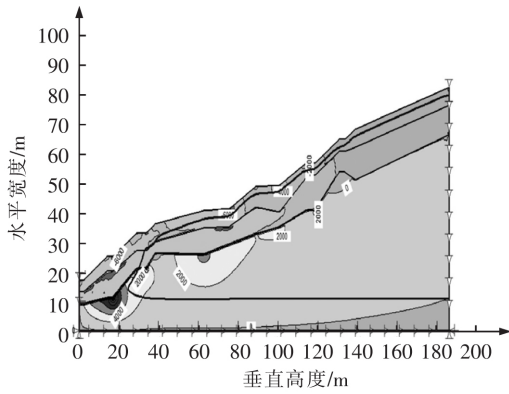


(d) 危险滑移面

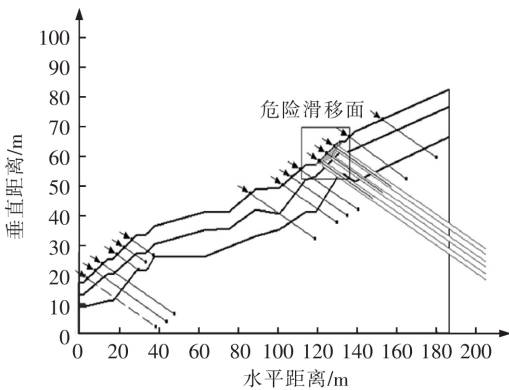
图7 2013年12月的边坡计算结果



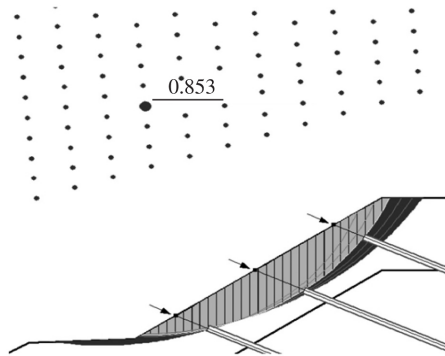
(a) 孔隙压力场



(b) 有效应力场



(c) 危险滑移面的搜索过程



(d) 危险滑移面

图 8 2013 年 5 月的边坡计算结果

在以上模拟过程基础上加密时间步, 得出 2013 年 1 月~12 月古田北站非饱和土边坡的安全系数, 如图 9 所示。由图 9 可以看出 2013 年 1 月份边坡稳定安全系数 FOS 为 1.55, 但是到 2013 年 4 月份边坡稳定安全系数 FOS 逐渐减小到 1.13。2013 年 5 月份和 6 月份边坡稳定安全系数 FOS 分别为 0.853 和 0.892, 由于边坡稳定安全系数小于 1, 说明边坡在暴雨作用下发生失稳。随着雨季的结束, 从 2013 年 7 月~12 月边坡稳定安全系数 FOS 逐渐增加, 到 2013 年 12 月达到最大值, 为 1.764。由于边坡计算失稳时间和边坡实际失稳时间基本吻合, 说明用改进的极限平衡法来预测非饱和土边坡的稳定是可行的。

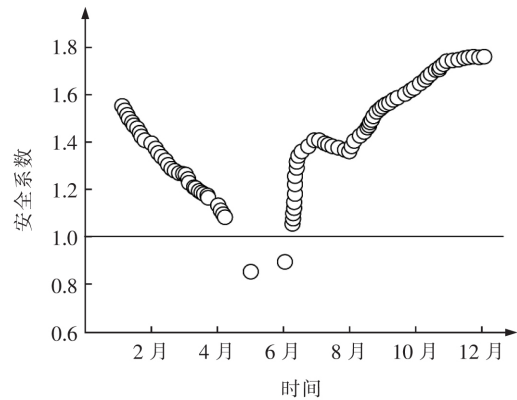


图 9 边坡稳定安全系数随时间的变化规律

5 结论

本文基于改进的极限平衡法及室内试验对古田北站非饱和土边坡的稳定性进行分析, 得出如下结论:

- (1) 采用改进的极限平衡法证明边坡在 2013 年 5 月份发生失稳, 这与实际失稳时间相吻合, 说明使用改进的极限平衡法来预测边坡的稳定性是可行的。
- (2) 降雨入渗产生瞬态孔隙压力场, 瞬态孔隙压力场可以改变有效应力场、边坡的饱和度及土样的基质吸力。
- (3) 基于基质吸力改进传统的极限平衡法, 此方法可以使非饱和土边坡稳定的预测更加准确, 从而可以为现场施工方案的变更提供依据。

参考文献:

[1] Buscarnera G., Whittle A. J. Constitutive Modelling Approach for Evaluating the Triggering of Flow Slides [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012(5): 499 - 511.

(下转第 66 页 To P.66)

- 国铁道科学 2001(2):55-60.
- Yao Song, Tian Hongqi. Crash Research on Thin-shelled Structure as Vehicle Energy-absorbing Components [J]. China Railway Science, 2001(2):55-60.
- [2] 高广军,田红旗,姚松等.列车多体耦合撞击分析[J].中国铁道科学 2005(4):93-97.
- Gao Guangjun, Tian Hongqi, Yao Song, etc. Multi-car Coupling Collision Analysis [J]. China Railway Science, 2005(4):93-97.
- [3] Baykasoğlu C, Sünbüloğlu E, Sureyya E, etc. Railroad Passenger Car Collision Analysis and Modifications for Improved Crashworthiness [J]. International Journal of Crashworthiness, 2011(3):319-329.
- [4] 朱翔.脱轨列车撞击站房结构的非线性响应及连续倒塌研究[D].兰州:兰州理工大学,2015.
- Zhu Xiang. Nonlinear Response and Progressive Collapse Research of Railway Station due to the Impact of Derailed Trains [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015.
- [5] 向俊,龚凯,毛建红等.高速列车运行安全性与桥梁防撞墙受力分析[J].铁道学报 2011(12):83-87.
- Xiang Jun, Gong Kai, Miao Jianhong, etc. Analysis on the Running Safety of High-speed Train and the Force of Bridge Collision-proof Wall [J]. Journal of the China Railway Society 2011(12):83-87.
- [6] 晏启祥,李彬,张蒙等.列车撞击荷载下盾构隧道双层衬砌管片结构的动力响应特性[J].中南大学学报:自然科学版 2015(9):3527-3534.
- Yan Qixiang, Li Bin, Zhang Meng, etc. Dynamic Response of Segment Structure of Double Lining Shield Tunnel under Train Impact Load [J]. Journal of Central South University: Science and Technology 2015(9):3527-3534.
- [7] Yan Qixiang, Li Bin, Geng Ping, etc. Dynamic Response of a Double-lined Shield Tunnel to Train Impact Loads [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016(53):33-45.
- [8] 王娜娜,马卫华.自动车钩的弹簧刚度和阻尼系数对列车纵向动力学的影响[J].内燃机车,2010(9):1-3.
- Wang Nana, Ma Weihua. Influence of Spring Stiffness and Damping Coefficient of Automatic Coupler on the Longitudinal Dynamics of Train [J]. Diesel Locomotives 2010(9):1-3.

(编辑 梅志山)

(上接第43页 From P. 43)

- [2] Lv Nianchun, Cheng Yunhong, Wang Yuntao, etc. Analytical Solutions of a Symmetrical Dynamic Crack Model of Bridging Fibers in Unidirectional Composites [J]. World Journal of Mechanics, 2013(3):22-32.
- [3] M. Mbonimpa, M. Aubertin, A. Maqsoud, etc. Predictive Model for the Water Retention Curve of Deformable Clayey Soils [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2006(9):1121-1132.
- [4] C. A. Burger, C. D. Shackelford. Soil-water Characteristic Curves and Dual Porosity of Sand-diatomaceous Earth Mixtures [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001(9):790-800.
- [5] Seboong Oh, Ning Lu. Slope Stability Analysis under Unsaturated Conditions: Case Studies of Rainfall-induced Failure of Cut Slopes [J]. Engineering Geology 2015(184):96-103.
- [6] A. A. Heshmati, M. R. Motahari. Modeling the Dependency of Suction Stress Characteristic Curve on Void Ratio in Unsaturated Soils [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2014(1):91-97.
- [7] L. A. Richards. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums [J]. Journal of Applied Physics, 1931(5):318-333.
- [8] M. T. V. Genuchten. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980(44):892-898.

(编辑 梅志山)