

文章编号: 1674—8247(2022)05—0036—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2022. 05. 008

## 膨胀土边坡稳定性理论计算方法对比研究

王森<sup>1</sup> 陈涛<sup>2</sup> 翁运新<sup>3</sup>

(1. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023; 2. 中铁城市发展投资集团有限公司, 成都 610000;)  
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**膨胀土边坡是工程实践中经常遇到的一种特殊土质边坡,该边坡的土质具有良好的亲水性,主要表现为失水收缩、吸水膨胀的物理特性,这使得膨胀土边坡成为岩土工程界的热点研究课题。本文通过引入膨胀力来对膨胀土边坡进行受力分析,总结了 Fellenius 法、Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法 4 种极限平衡法的计算原理,并结合国内某实际工程案例对 4 种方法分析讨论,对比在引入膨胀力前后边坡的安全系数,搜索计算膨胀土边坡的最危险滑动面和稳定性系数 K 值。研究结果表明:(1)采用 Fellenius 法对边坡的稳定性进行分析时边坡更偏于安全;(2)考虑膨胀力的作用对边坡的稳定性计算更加偏于安全;(3)边坡中膨胀土的膨胀力越大,在其浅表层发生滑坡的几率越大。

**关键词:**边坡稳定性;膨胀土;Fellenius 法;Bishop 法;Morgenstern-Price 法;Spencer 法

**中图分类号:** U213.1<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A

## Comparative Study on Theoretical Calculation Methods of Expansive Soil Slope Stability

WANG Sen<sup>1</sup> CHEN Tao<sup>2</sup> WENG Yunxin<sup>3</sup>

(1. CREEC (Chongqing) Survey, Design and Research Co., Ltd., Chongqing 400023, China;  
2. China Railway City Development and Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China;  
3. China Railway Eryuan Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Expansive soil slope is a special soil slope frequently encountered in engineering practice. The soil of this slope has good hydrophilicity, which is mainly reflected by its physical characteristics of expanding in the presence of water and shrinking in the condition of water loss. This makes expansive soil slope a hot research topic in geotechnical engineering. This paper provides the stress analysis of the expansive soil slope by introducing expansive force, summarizes the calculation principles of four limit equilibrium methods, namely Fellenius method, Bishop method, Morgenstern-Price method and Spencer method, analyzes and discusses the four methods by combining a practical project case in China, compares the safety factors of the slope before and after the introduction of expansive force, and searches and calculates the most dangerous sliding surface and stability coefficient K of the expansive soil slope. The results show that: (1) The slope is safer when Fellenius method is used to analyze the stability of the slope. (2) The slope stability calculated is safer when the effect of expansive force is taken into consideration. (3) The slope is more likely to experience landslide in its shallow surface layer if the expansive soil in the slope has a larger expansive force.

**Key words:** slope stability; expansive soil; Fellenius method; Bishop method; Morgenstern-Price method; Spencer method

收稿日期: 2021-04-08

作者简介: 王森(1988-),男,工程师。

引文格式: 王森,陈涛,翁运新. 几种膨胀土边坡稳定性理论计算方法对比研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 36-41.

WANG Sen, CHEN Tao, WENG Yunxin. Comparative Study on Theoretical Calculation Methods of Expansive Soil Slope Stability [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 36-41.

膨胀土边坡是一种以膨胀土为主要土质成分的特殊边坡,此类边坡通常会因遇水膨胀、失水收缩等特性而在坡体上产生许多裂隙,从而导致边坡土体发生失稳,引起土体坍塌、滑坡等自然灾害。

针对膨胀土边坡稳定性的分析受到了国内外众多专家学者的积极关注和深入研究,此类课题逐渐成为岩体工程领域乃至土木工程领域中热点课题<sup>[1-3]</sup>。当前,针对膨胀土边坡的稳定性分析普遍采用极限平衡法进行研究,主要方法包含:Fellenius法<sup>[4]</sup>(假设土条间的作用力忽略不计)、Morgenstern-Price法<sup>[5]</sup>、简化 Bishop法<sup>[6]</sup>(毕肖普法,考虑土条间作用力)和 Spencer法<sup>[7]</sup>。利用 Geo-Slop 软件,祝方才<sup>[8]</sup>等在天然与饱和两种状态下应用4种极限平衡方法分别对深圳高速公路的路堑边坡稳定性进行对比研究,最终针对性提出了该边坡的支护手段;针对 Fellenius 法,根据某工程实例,李闯<sup>[9]</sup>等利用微分法建立数学模型对其进行分析,并求解该边坡的安全系数  $K$ ;刘茂<sup>[10]</sup>等利用简化 Bishop 法对圆弧形滑动面土质坡体进行稳定性评价,推导出与之相适应的下滑推理解析计算公式;在充分考虑孔隙水渗流的情况下,杨建民<sup>[11]</sup>等使用 Morgenstern-Price 法分别对两个工程算例的有效应力进行计算验证,证明了此方法的准确性和有效性;基于 Spencer 法,陈昌富<sup>[12]</sup>等采用斜条分法土质边坡的位移进行计算,在考虑滑动面抗剪强度震动衰减的影响下,提出一种新的计算方法,并用试验证明了该方法适用性广泛、计算精度高的特点。

本文通过引入膨胀力分别探讨4种边坡稳定性分析方法的计算原理及过程,结合国内西部某工程实例,对引入膨胀力前后的膨胀土边坡稳定性系数进行计算和对比,以探究这4类方法对膨胀土边坡的适宜性和准确性,研究成果可为今后研究膨胀土边坡稳定性问题提供参考依据。

## 1 膨胀力的引入

膨胀力是由土体吸水发生体积膨胀而产生的一种面力,先前研究发现土体的膨胀力能减小因剪切强度而产生的作用力。此膨胀土类边坡的膨胀力作用范围受到土体含水量的变化影响很大,并且受大气影响也较为显著,土体的含水量也随着当地天气的原因而出现较大的波动。同时,随着土层的增加,土体膨胀力波动范围也逐渐减小,当土层达到一定深度,土体的膨胀力将会趋于某个稳定值。土体膨胀力影响范围如图1所示。

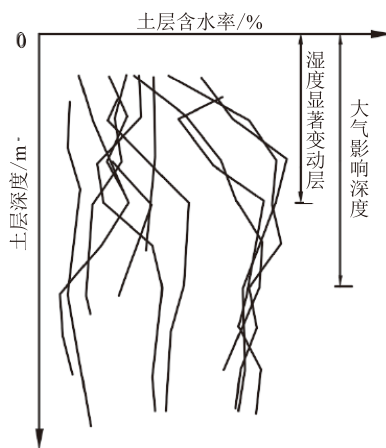


图1 膨胀土的湿度随深度变化曲线图

根据摩尔库伦(Mohr - Coulomb)强度准则,现对膨胀土做一个简要的力学分析,推导出考虑膨胀力的抗剪强度表达式为:

$$\tau_f = c + (\sigma - p) \tan \varphi \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ ——法向压应力;

$p$ ——沿作用面法向的膨胀力;

$c$ ——膨胀土的粘聚力;

$\varphi$ ——内摩擦角。

## 2 几种边坡稳定性方法计算理论

### 2.1 Fellenius法

膨胀土边坡应用 Fellenius 法的计算简图如图2所示。该方法的计算原理即是将滑动体竖向平均划分为  $n$  条土体单元,将其中一条土体单元单独拿出来进行受力分析,并假定每个相邻的土体单元之间不存在任何作用力,最后通过计算滑动面上整个土体的抗滑力矩与下滑力矩之间的关系就可求出膨胀土边坡的稳定性系数  $K$ 。

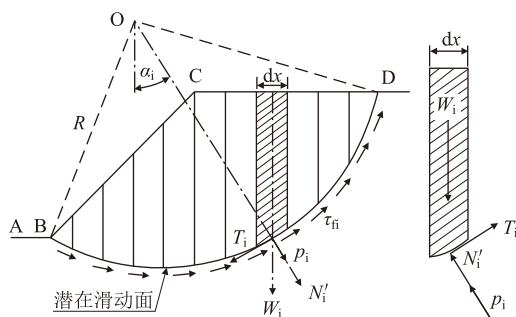


图2 Fellenius法计算简图

单个土条单元的法向应力为  $N_i'$  和切向应力为  $T_i$ , 假定滑动面处的膨胀力  $P_i$  作用在每个土条底部的中点,则对于第  $i$  个土条单元位于滑动面上土的抗剪强

度为:

$$\tau_{fi} = \frac{N'_i}{l_i} \tan \varphi_i + c_i \quad (2)$$

而某个土体单元需要满足水平方向和竖向方向的静力平衡条件为:

$$N'_i + p_i = W_i \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i \quad (4)$$

根据 Fellenius 法,将膨胀土边坡滑动面上土体的抗滑力矩  $M_r$  与下滑力矩  $M_s$  作比值:

$$K = \frac{M_r}{M_s} = \frac{\tau_{fi} l_i R}{T_i R} \quad (5)$$

现将式(2)代入到第  $i$  个土体单元的滑动面抗剪强度分析的公式中,得出 Fellenius 简化条分法关于膨胀土边坡稳定性系数  $K$  值的表达式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cos \alpha_i - p_i l_i) \tan \varphi_i + c_i l_i}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (6)$$

式中:  $W_i$ ——第  $i$  个土条单元的重度;

$p_i$ ——滑动面上第  $i$  个土体单元的膨胀力;

$l_i$ ——第  $i$  个土条单元滑动面处的长度;

$R$ ——圆弧滑动面半径;

$N'_i$ ——第  $i$  个土条单元的法向压力;

$T_i$ ——第  $i$  个土条单元的切向应力;

$\alpha_i$ ——第  $i$  个土条单元滑动面的倾角。

## 2.2 Bishop法

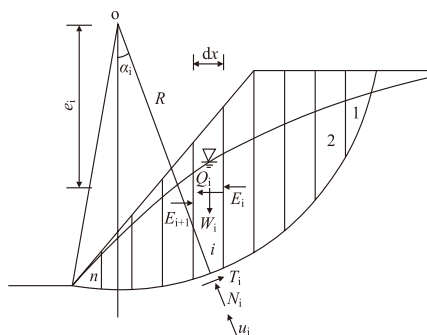
Bishop 法是一种应用范围较为广泛、分析计算过程简洁的条分方法,在不同情况下该方法的计算结果都很准确,但该方法的不足之处是仅能用于圆弧滑裂面和数值分析问题方面的研究。与 Fellenius 法相比, Bishop 方法主要考虑了单元土体之间的作用力,此外, Bishop 方法还认为在单元土体底部滑动面上的抗滑安全系数,与整个膨胀土边坡滑动面的安全系数相同。 Bishop 方法的计算模型如图 3 所示。

假定每个单元土条两侧的竖向剪切力大小相等,即,  $E_i + E_{i+1}$  则边坡潜在滑动面上每处土体的抗剪强度与相应方向的剪应力之比为:

$$T_i = \frac{1}{K} \tau_{fi} l_i \quad (7)$$

每个单元土条底部的中点位置都作用有法向应力  $N'_i$  和  $T_i$  切向应力,即对于第  $i$  个单元土条的滑动面上土的抗剪强度的表达式为:

$$\tau_{fi} = \frac{N'_i}{l_i} \tan \varphi_i + c_i \quad (8)$$



注:  $E_i, E_{i+1}$ ——表示单元土条之间的作用力;

$W_i$ ——第  $i$  个单元土条的自重力;

$Q_i$ ——水平惯性矩力;

$N'_i, T_i$ ——第  $i$  条块土底部的切向力和法向力;

$u_i$ ——膨胀土的渗透水压力;

$b_i, l_i, \alpha_i$ ——分别表示土条的宽度、长度与倾角;

$h_{wi}$ ——第  $i$  个单元土条底部中点到水位线的竖向距离;

$\beta_i$ ——第  $i$  个单元土条水位线的倾角;

$e_i$ ——第  $i$  个单元土条重心到滑动面圆心的垂直距离;

$R$ ——边坡的滑动面半径。

图 3 Bishop 法计算简图

单元土条竖直方向力的平衡条件为:

$$W_i - T_i \cos \alpha_i - N'_i \cos \alpha_i + p_i \cos \alpha_i = 0 \quad (9)$$

根据极限平衡法的应用条件,得出应用 Bishop 条分法的膨胀土边坡的稳定性系数  $K$  的表达式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{ai}} ((W_i - p_i l_i \cos \alpha_i) \tan \varphi_i + c_i l_i \cos \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (10)$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i + \frac{1}{K} \tan \varphi_i \sin \alpha_i \quad (11)$$

由式(10)可得,膨胀土边坡的稳定性系数  $K$  与  $m_{ai}$  值之间存在相互迭代的关系,因此在确定两者的值时应首先假定一个  $K$  值,并通过式(11)求得  $m_{ai}$  的值,然后再代入式(10)中求取  $K$  值,若计算所求得的  $K$  值与假定的  $K$  值不符合,则重复上述过程重新计算  $K$  值和  $m_{ai}$  的值,经过反复迭代计算直到  $K$  值与假定的值相近(或满足预先设计精度的要求)为止。

## 2.3 Morgenstern-Price法

Morgenstern-Price 法被国际学术学会与广大研究学者认为在边坡稳定性分析方面最具适应性和最具严谨性。该方法能同时满足力和力矩均平衡的两个条件。对于任意类型的坡体滑动面,第  $i$  个

单元土条的受力分析模型均可以简化,如图4所示。Morgenstern-Price法应用的前提条件是,两个相邻单元土条的法向条间力  $E_i$  和切向条间力  $X_i$  之间存在一个函数关系:

$$X = \lambda f(x) E \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  ——任意常数;

$f(x)$  ——已知函数关系。

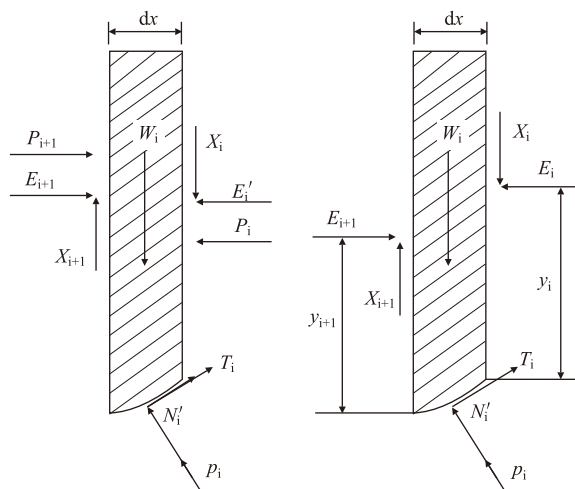


图4 Morgenstern-Price 法土条分析图

为方便计算迭代,假定第  $i$  个单元土条两侧的总法向力  $E_i$  等于条间膨胀力  $P_i$  与有效法向力  $E'_i$  之和,并且  $E_i$  和  $E_{i+1}$  在第  $i$  个单元土条两侧的作用点距土体滑动面的高度分别为  $y_i$  和  $y_{i+1}$ :

$$E_i = E'_i + P_i, E_{i+1} = E'_{i+1} + P_{i+1} \quad (13)$$

将膨胀土滑动带均分为  $n$  个单元土条,一个单元土条的自重  $W_i$  和单元土体的条间膨胀力  $P_i$  均已知,单元土条两侧的总法向力  $E_i, E_{i+1}$ ;单元土体的切向条间力  $X_i, X_{i+1}$ ;作用点距滑动面的高度  $y_i, y_{i+1}$ ;法向应力  $N'_i$ ;切边应力  $T_i$  和常数  $\lambda$  为未知量,合计共  $8n + 2$  个未知量。

在单元土条之间的界面上,根据力具有连续的性质,可得到  $2(n + 1)$  个方程:

$$\begin{aligned} E_{i+1} &= E_i \\ y_{i+1} &= y_i \end{aligned} \quad (14)$$

由滑动面的抗剪强度方程,合计共  $n$  个方程:

$$\tau_{fi} = \frac{N'_i}{l_i} \tan \varphi_i + c_i \quad (15)$$

根据单元土条两侧的总法向力  $E_i$  与其切向条间力  $X_i$  之间存在的函数关系,合计共  $2n$  个方程:

$$\begin{aligned} X_i &= \lambda f(x) E_i \\ X_{i+1} &= \lambda f(x) E_{i+1} \end{aligned} \quad (16)$$

则根据单元土条的静力平衡方程共  $3n$  个:

$$E_{i+1} + T_i \cos \alpha_i = E_i + N'_i \sin \alpha_i + P_i \sin \alpha_i \quad (17)$$

$$W_i + X_i = X_{i+1} + N'_i \cos \alpha_i + P_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i \quad (18)$$

$$X_i \frac{dx}{2} + X_{i+1} \frac{dx}{2} + E_i \left( y_i + \frac{dx}{2} \tan \alpha_i \right) = E_{i+1} \left( y_{i+1} - \frac{dx}{2} \tan \alpha_i \right) \quad (19)$$

当整个滑动土体上没有其他力作用时,则第  $i$  和第  $n$  个单元土条之间必须满足以下两个关系式,即:

$$E_0 = 0, E_n = 0 \quad (20)$$

$$E_0 = 0, E_n = 0 \quad (21)$$

将式(12) ~ 式(21)进行联立求解即可得到考虑膨胀土边坡的稳定系数  $K$ 。

## 2.4 Spencer法

Spencer法是被广泛应用于土质边坡稳定性分析的方法之一<sup>[7]</sup>,其采用总应力法对整个边坡进行分析求解。通过对一个土条单元进行受力,将坡体土条单元进行力和力矩的平衡分析,假定各个土条之间作用力的合理平行,而后对土质边坡进行安全系数求解。现将本分析方法进行图解描述,将第  $i$  个土条单元进行受力分析,如图5所示。

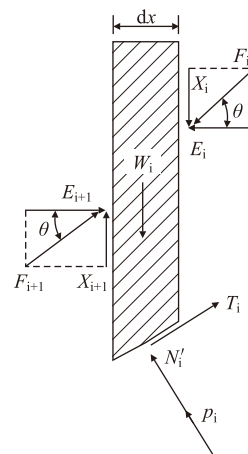


图5 Spencer 法土条分析简图

假设相邻的单元土条之间的法向条间力  $E_i$  不与切向条间力  $T_i$  之间存在以下关系:

$$\frac{X_i}{E_i} = \frac{X_{i+1}}{E_{i+1}} = \tan \theta \quad (22)$$

式中:  $\theta$  ——任意常数。

相邻的两个垂直单元土条底部力的平衡方程为:

$$(N'_i + P_i) - (F_i - F_{i+1}) \sin(\alpha_i - \theta) - W_i \cos \alpha_i = 0 \quad (23)$$

相邻两个平行单元土条底部力的平衡方程为:

$$T_i - (F_i - F_{i+1}) \cos(\alpha_i - \theta) - W_i \sin \alpha_i = 0 \quad (24)$$

再按照稳定性系数定义的 M - C 准则可得:

$$T_i = \frac{1}{K}(N_i' \tan \varphi_i + c_i l_i) \tag{25}$$

则土条两侧条间力的合力为:

$$F_i - F_{i+1} = \frac{\frac{c_i l_i}{K} + \frac{\tan \varphi_i}{K}(W_i \cos \alpha_i - p_i l_i) - W_i \sin \alpha_i}{\cos(\alpha_i - \theta) \left( 1 + \frac{\tan \varphi_i}{K} \tan(\alpha_i - \theta) \right)} \tag{26}$$

整个滑动坡体应该满足的力平衡和力矩平衡:

$$\sum (F_i - F_{i+1}) = 0 \tag{27}$$

$$\sum (F_i - F_{i+1}) \cos(\alpha_i - \theta) R = 0 \tag{28}$$

式中:  $F_i$ ——第  $i$  个单元土条两侧条间力的合力。

联立式(22) ~ 式(28),根据极限平衡法的条件,可通过 Spencer 法得到考虑膨胀力下的土质边坡稳定性系数  $K$ 。

3 工程实例

选取西南地区某膨胀土边坡工程实例进行分析研究,边坡坡高 10.0 m,坡脚 40°,在坡底 5.0 m 范围内没有发现地下水。坡面护坡采用混凝土进行喷射,但其防渗能力较差,在多雨情况下,会有严重的失稳现象。为简化计算,将边坡土体设置为均质土,对开挖膨胀土边坡进行计算分析。室内试验测得该边坡土质的膨胀力最大值约为 29.5 kPa,自由膨胀率为 54.1%。膨胀土边坡物理参数如表 1 所示,绘制膨胀土边坡横断面如图 6 所示。

表 1 膨胀土的物理参数表

重度/ (kN/m³)	粘聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	膨胀率 /%	膨胀力 /kPa	泊松比 μ	饱和度
18	9	7.4	54	29.5	0.44	0.85 - 1

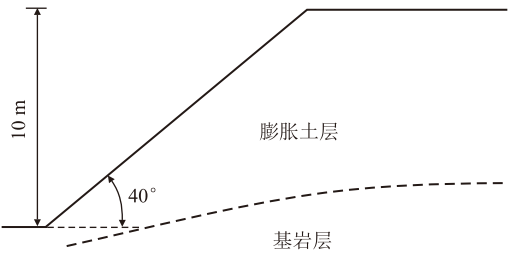


图 6 边坡横断面示意图

分别采用 Fellenius 法、Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法对选取的膨胀土边坡模型的稳定系数进行计算分析,针对考虑膨胀力(工况 I)对膨胀土边坡进行极限平衡分析,并将分析结果与不考虑膨胀力(工况 II)计算结果进行对比分析。4 种极限

平衡法的结果对比如表 2 所示。

表 2 极限平衡法计算结果对比表

方法	工况	稳定系数	最危险滑动面 圆心	半径/m
Fellenius	I	0.454	(1.6, 14.2)	14.24
	II	0.562	(1.8, 14.5)	14.88
Bishop	I	0.471	(0.7, 15.7)	15.85
	II	0.582	(1.3, 15.6)	15.66
Morgenstern - Price	I	0.508	(1.3, 9.9)	10.04
	II	0.624	(1.7, 9.9)	10.13
Spencer	I	0.502	(1.5, 10.1)	10.36
	II	0.626	(1.6, 10.2)	10.14

由表 2 可知,Fellenius 法、Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法在考虑膨胀力的作用下,其边坡稳定系数分别为 0.454、0.471、0.508 和 0.502;对比不考虑膨胀力的稳定性系数进行分析,其边坡稳定性系数降低了 20% ~ 30%;由此可知,考虑膨胀力的边坡稳定性系数更偏于保守,将膨胀力考虑在边坡稳定性分析中能够更好的保证边坡的稳定性。4 种极限平衡法,计算出的边坡稳定系数基本相近,Fellenius 法计算得到的稳定性系数更小,即采用 Fellenius 法对边坡的稳定性分析更偏于安全。

膨胀力是膨胀土这种特殊土体的一种重要特性,建立新的膨胀土边坡模型,模型坡高 6.0 m,坡脚呈 49°、土的黏聚力  $c = 15$  kPa、内摩擦角  $\psi = 7.4^\circ$ ,重度  $= 18.0$  kN/m³。在考虑膨胀力的基础上,分别采用 Fellenius 法、简化 Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法对边坡的最危险滑动面进行搜索,经过反复迭代计算后得到边坡的最危险滑动面以及边坡稳定系数  $K$  值,各方法的滑动面和  $K$  值如图 7 所示。

4 种方法的边坡稳定系数随膨胀力的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,随着膨胀力的增加,4 种方法计算的稳定系数呈现相同的线性减小,但 Fellenius 法计算的稳定系数较其余 3 种方法得到的稳定系数偏小;4 种极限平衡法对应滑动面深度随着土质膨胀力的增加而减小,即土质的膨胀力越大,对应边坡的表层也发生滑动的概率越大。

4 结论

(1) 通过具体的工程实例对 Fellenius 法、Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法等 4 种极限平衡法的稳定系数进行比较,发现应用 Fellenius 法对边坡的稳定性分析更偏于安全。

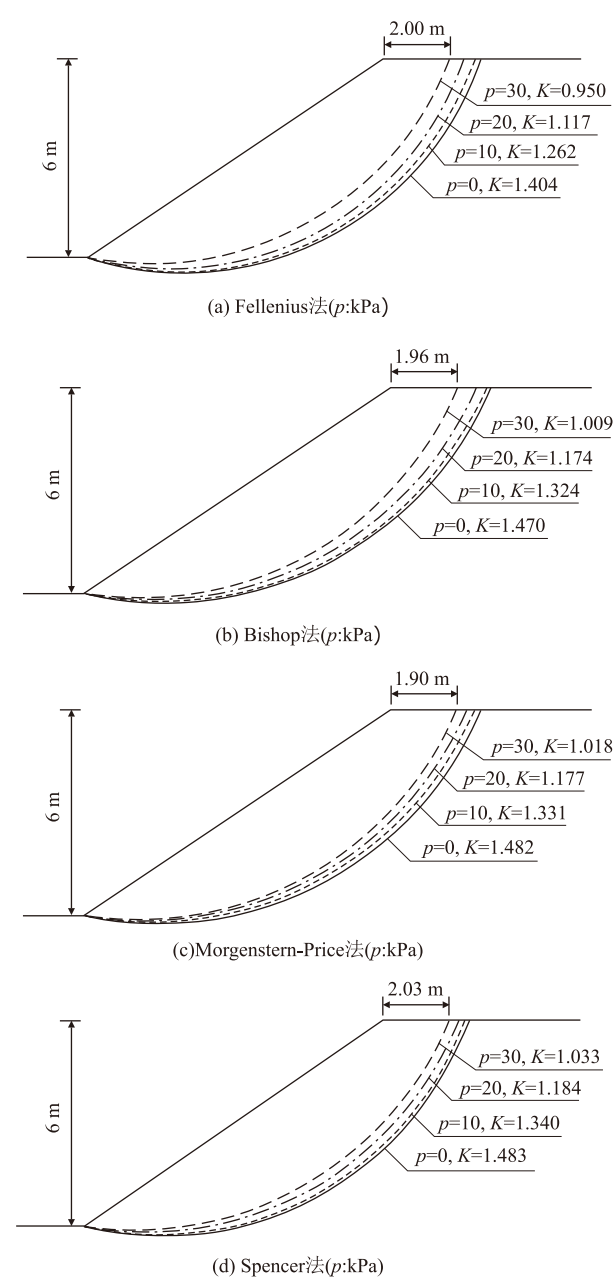


图 7 膨胀力对边坡稳定性的影响图

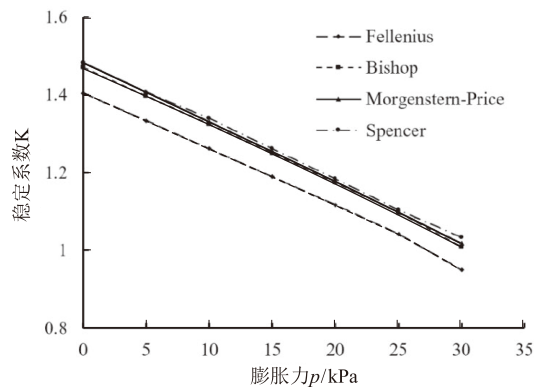


图 8 边坡稳定系数随膨胀力变化曲线图

(2)通过引入膨胀力对膨胀土边坡进行受力分析,并通过具体工程实例分析考虑膨胀力前后膨胀土边坡安全稳定性的变化,得出考虑膨胀力的作用对边坡的稳定性计算更加偏于安全。

(3)随着土质膨胀力的增加,边坡的稳定系数逐渐减小,即边坡中膨胀土的膨胀力越大,其浅表层发生滑坡的几率越大。

(4)膨胀力相对比较复杂,在今后的实际工程中,需要根据实际情况对膨胀力加以考虑,以便更好地保证边坡的稳定性。

参考文献:

[1] 郑硕, 黎凤林, 杨超炜. 特殊土边坡的植被防护工程及景观研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 234 – 238.

ZHENG Shuo, LI Fenglin, YANG Chaowei. Vegetation Protection and Landscape Engineering Based on Special Soil Slope [J]. Highway Engineering, 2020, 45(5): 234 – 238.

[2] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

ZHENG Jianlong, YANG Heping. Expansive Soil Engineering Inhighway [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.

[3] 晏仁, 翁运新, 晏园, 等. 裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 1 – 7.

YANRen, WENG Yunxin, YAN Yuan, et al. Influence of Fissure on Stability of Expansive Soil Slope [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 1 – 7.

[4] FELLENIUS W. Erdstatisch Berechnungen [M]. Berlin W. Ernst and Sohn Revised Edition, 1939.

[5] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces [J]. Géotechnique, 1965, 15(1): 79 – 93.

[6] BISHOP A W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes [J]. Géotechnique, 1955, 5(1): 7 – 17.

[7] SPENCER E. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces [J]. Geotechnique, 1967, 17: 384 – 386.

[8] 祝方才, 刘佳鹏, 刘增杰. 几种常用边坡稳定性分析方法的比较[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 1 – 5.

ZHU Fangcai, LIU Jiapeng, LIU Zengjie. Comparison of Several Common Methods of Slope Stability Analysis [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2019, 33(2): 1 – 5.

[9] 李闯, 赵盛杰, 董晔, 等. Fellenius 法的解析解法[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 202 – 210.

LI Chuang, ZHAO Shengjie, DONG Ye, et al. The Analytical Solution of Fellenius Method [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(5): 202 – 210.

[10] 刘茂, 杨红娟, 钱江澎. 简化 Bishop 法的剩余下滑推力计算方法研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1056 – 1062.

(下转第 68 页)

求。同时,系统配置有视频备份,可对发生报警的现场全程录像,为事后溯源分析提供便利。

### 3 结束语

目前,安设在沪昆铁路某处的“基于三维模式的铁路线路障碍监测报警系统”已在高温、大雨、浓雾的环境中稳定工作近两年。该报警系统采用数据融合技术对入侵障碍物进行准确的识别分类,自动准确识别列车临停、移动的行人及小动物等复杂场景,提高了线路障碍物自动监测报警系统的有效报警率,有效杜绝了漏判。

异物侵限报警系统是铁路行车安全防护的重要设备,对报警的实时性要求极高,现有技术条件给予报警算法处理的时间只有 14 s。通过系统研发实践,结合铁路应用的实际,可得出如下结论:(1)数据层融合难以使用在多型传感器的复杂系统中;(2)特征层融合在两个不同型传感器系统中算法复杂,判识结果不理想,主要原因是算法的复杂性及时效性限制;(3)决策层融合数据算法成熟,判识准确,在模拟环境和实际应用中测试结果理想。

### 参考文献:

- [1] 汪希时. 智能铁路交通控制技术及其展望[J]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(5): 39-43.  
WANG Xishi. Intelligent Railway Transportation Control Techniques and Its Prospect [J]. World Sci-Tech R & D, 2002, 24(5): 39-43.
- [2] 郑亚宏, 何家玉. 铁路线路障碍监测报警系统研究[J]. 中国铁路, 2019(9): 111-117.  
ZHENG Yahong, HE Jiayu. Research on Obstacle Monitoring and Alarm System on Railway Lines [J]. China Railway, 2019(9): 111-117.
- [3] 周世明. 浅谈三维激光扫描技术在复杂艰险山区铁路全生命周期建设中的应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 31-35.  
ZHOU Shiming. Discussion on the Application of 3D Laser Scanning Technology in the Full-Life-Cycle Construction of Complex and Difficult Mountains Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 31-35.
- [4] 宁滨, 余祖俊, 朱力强, 等. 铁路远程瞭望系统研究与应用[J]. 铁道学报, 2014, 36(12): 62-69.  
NING Bin, YU Zujun, ZHU Liqiang, et al. Remote Observation System of Railway and Its Application [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(12): 62-69.
- [5] 张景利. 线路障碍自动监测报警系统及其应用[J]. 中国铁路, 2019(3): 95-99.  
ZHANG Jingli. Automatic Track Monitoring and Alarming System and Its Application [J]. China Railway, 2019(3): 95-99.
- [6] 陆建峰, 唐振民, 杨静宇, 等. 多传感器的联合标定方法[J]. 机器人, 1997(5): 365-371.  
LU Jianfeng, TANG Zhenmin, YANG Jingyu, et al. Sensor Unified Calibration in Multisensor Data Fusion [J]. Robot, 1997(5): 365-371.
- [7] 房建武, 王贺, 薛建儒, 等. 基于视觉和激光数据融合的 3D 多目标跟踪[J]. 无人系统技术, 2019, 2(5): 24-29.  
FANG Jianwu, WANG He, XUE Jianru, et al. Multiple 3D Object Tracking with RGB and 3D-LiDAR Data Fusion [J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(5): 24-29.
- [8] 付耀文. 雷达目标融合识别研究[D]. 长沙: 中国人民解放军国防科学技术大学, 2003.  
FU Yaowen. Research on Radar Target Fusion Recognition [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [9] 铁总科技〔2015〕184号, 线路障碍自动监测报警系统暂行技术条件[S].  
Tie Zong Ke Ji〔2015〕No.184, Provisional Technical Specifications for Automatic Monitoring and Alarming System of Line Obstacle[S].
- [10] Q/CR-CDT 007-2021 基于三维模式的线路障碍自动监测报警系统技术条件: [S].  
Q/CR-CDT 007-2021 Technical Specifications for Automatic Monitoring and Alarm System of Line Obstacle based on 3D Mode[S].
- [11] 杨建民, 张正, 陈凯强. 土坡稳定分析 Morgenstern-Price 法的有效应力形式[J]. 工业建筑, 2019, 49(6): 117-123.  
YANG Jianmin, ZHANG Zheng, CHEN Kaiqiang. Effective Stress Form of Morgenstern-Price Method for Soil Slope Stability Analysis [J]. Industrial Construction, 2019, 49(6): 117-123.
- [12] 陈昌富, 朱剑锋, 龚晓南. 基于响应面法和 Morgenstern-Price 法土坡可靠度计算方法[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 166-172.  
CHEN Changfu, ZHU Jianfeng, GONG Xiaonan. Calculation Method of Earth Slope Reliability Based on Response Surface Method and Morgenstern-Price Procedure [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 166-172.

(上接第 41 页)

LIU Mao, YANG Hongjuan, QIAN Jiangpeng. Calculation Method of Landslide Residual Sliding Force Using Simplified Bishop Method [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1056-1062.

- [11] 杨建民, 张正, 陈凯强. 土坡稳定分析 Morgenstern-Price 法的有效应力形式[J]. 工业建筑, 2019, 49(6): 117-123.  
YANG Jianmin, ZHANG Zheng, CHEN Kaiqiang. Effective Stress