

国家天文台500米口径球面射电望远镜台址球冠型边坡稳定性分析

陈德茂, 沈志平, 姜 鹏, 付君宜, 刘 慧

An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China

CHEN Demao, SHEN Zhiping, JIANG Peng, FU Junyi, and LIU Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models

穆成林, 裴向军, 裴钻, 张引, 习朝辉 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 150-158

岩质边坡复合型破坏机制的改进运动单元法研究

Investigation on combined failure mechanism of rock slope based on the improved kinematical element method

张科, 侯杰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 95-101

不同加固技术在散粒体斜坡表层的应用对比研究

Research on the effect of different reinforcement methods on the surface of a granular slope

杨晴雯, 裴向军, 吴梦秋, 常志璐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 139-139

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

层状边坡岩体的屈曲和溃屈性态研究

Buckling and buckling failure behavior of bedding slope rock mass

陈笑楠, 张慧梅, 周洪文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 141-147

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012006

国家天文台 500 米口径球面射电望远镜台址 球冠型边坡稳定性分析

陈德茂¹, 沈志平¹, 姜 鹏², 付君宜¹, 刘 慧¹

(1. 贵州正业工程技术投资有限公司, 贵州 贵阳 550012; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 中国科学院国家天文台 500 米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)台址位于岩溶洼地内, 开挖完成后的洼地边坡外形接近球冠型边坡, 属于轴对称圆形凹坡, 坡体由胶结的土石混合体和石灰岩组成, 局部稳定性良好, 整体稳定性有待评价。目前边坡整体稳定性评价通常采用基于平面应变假定的极限平衡法, 由于未考虑边坡外形, 该方法用于轴对称圆形凹坡稳定性的评价结果有偏差。为消除上述偏差, 将轴对称圆形凹坡滑体划分为多个环形条块, 考虑环形条块轴力的抗滑作用, 提出了针对轴对称圆形凹坡的极限平衡法改进方法; 并采用数值分析方法对改进后的简化 Bishop 法进行验证, 结果表明改进后的简化 Bishop 法安全系数计算结果较未改进方法略有提高, 与数值分析法结果基本一致。同时给出轴对称圆形凸坡的安全系数计算公式, 计算结果表明圆形凸坡稳定性与直线形边坡较为接近。上述两种计算方法为类似外形的边坡稳定性评价提供了新的途径。

关键词: 国家天文台 500 米口径球面射电望远镜; 球冠型边坡; 轴对称圆形凹坡; 极限平衡法; 边坡稳定性

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0116-08

An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China

CHEN Demao¹, SHEN Zhiping¹, JIANG Peng², FU Junyi¹, LIU Hui¹

(1. Guizhou Zhengye Engineering and Technology Investment Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550012, China;

2. National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China)

Abstract: The site of Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope is located in karst depression, and the depression slope shape after excavation is like a spherical cap shape slope which belongs to an axisymmetric circular concave slope. The slope is composed of cemented soil-rock mixture and limestone. The slope is locally stable, but the stability of slope in a whole is still unknown. At present, evaluation of the slope stability in a whole is usually using the limit equilibrium method which is based on plane strain, and error arises in the evaluation results of the axisymmetric circular concave slope because of ignoring the slope shape. To eliminate the error, the slide body of the axisymmetric circular concave slope is divided into many annulus slices in the study, the anti-slide capacity of annulus slices axial force is considered and the improved limit equilibrium method which is suitable to the axisymmetric circular concave slope is proposed. The improved simplified Bishop method is verified with the numerical analysis method. The results show that the safety factor of the improved simplified

收稿日期: 2020-12-07; 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 贵州省科技计划(黔科合 SY 字【2014】3086 号)

第一作者: 陈德茂(1978-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方向的研究工作。E-mail: 415981578@qq.com

通讯作者: 沈志平(1960-), 男, 学士, 工程技术应用研究员, 主要从事岩土工程方向的研究工作。E-mail: 1608945827@qq.com

Bishop method is a little larger than that with the traditional calculation method, and the safety factor of the improved simplified Bishop method is close to the numerical method result. The safety factor equation of the axisymmetric circular convex slope is given, and the results show that the stability of the axisymmetric circular convex slope is close to that of the ordinary slope. The above two calculation methods may provide new ways to evaluate the stability of slope with similar slope shape.

Keywords: FAST; spherical cap shape slope; axisymmetric circular concave slope; limit equilibrium method; stability of slope

山区工程建设不可避免地会遇到边坡问题。边坡稳定性评价方法目前主要包括极限平衡法、极限分析法、数值分析法三类。瑞典圆弧法作为极限平衡法的一种最早由 Fellenius 于 1927 年提出, Bishop 对瑞典圆弧法进行了改进并提出了满足力矩平衡的简化 Bishop 法^[1-2]; 针对 Bishop 法不满足力平衡条件的问题, Janbu 提出了满足力平衡条件的 Janbu 法^[3]; 郑颖人等^[4]分析了几种极限平衡法的精度问题; 麻官亮等^[5]将 Spencer 法应用到三维边坡模型的稳定性评价中。极限分析法由 Drucker 和 Prager 于 1952 年提出, 该方法考虑了静力场和速度场, 根据满足的条件不同分为上限解法(能量法)和下限解法^[6-8], 当上限解和下限解相等时即为边坡稳定性的真实解^[9]。数值分析法于 20 世纪 60 年代提出, 目前主要包括有限元法、离散元法、有限差分法、边界元法。基于不同的理论, 各数值分析法均有各自的优势和局限性^[10-13]。工程中最常用的数值分析方法是有限元法, 能够较好地处理小变形问题, 配合强度折减法^[14-16]可以获得边坡安全系数。

目前极限平衡法依然是工程中常用的边坡稳定性分析方法, 该类方法基于平面应变假定而未考虑边坡外形, 在评价球冠型边坡这类有明显外形影响的边坡稳定性时有较大误差, 本文研究旨在消除该误差问题。

1 FAST 台址区域概况

中国科学院国家天文台 500 米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)位于贵州省平塘县大窝凼洼地内。大窝凼洼地发育在云贵高原向广西丘陵过渡带的大小井地下河系统中, 为“U”字型岩溶洼地, 地层岩性由黏土、溶塌混合物、三叠系中统凉水井组石灰岩组成。黏土仅分布于洼地底部, 厚度一般 3~5 m; 溶塌混合物分布于斜坡地带及洼地底部黏土层之下, 厚度一般 5~50 m, 平均 30 m; 浅表为未胶结的大块石, 中下部为半胶结、

胶结的土石混合物, 均匀性差; 三叠系中统凉水井组白云质灰岩、含泥灰岩出露于洼地上部陡坡地段, 中至厚层状, 属较软至较硬岩, 岩体较破碎至较完整。

为契合 FAST 主动反射面形状, 台址开挖完成后在反射面圈梁以下范围内形成了大规模球冠型边坡^[17], 如图 1 所示。由于浅表层未胶结的溶塌混合物极易发生破坏^[18], 开挖时清除了大量该类土体, 开挖完成后的球冠型边坡主要由胶结的溶塌混合物和下伏基岩组成, 局部稳定性良好, 但球冠型边坡整体稳定性评价缺少相关计算方法。



图 1 FAST 台址球冠型边坡

Fig. 1 Spherical cap shape slope of FAST

考察边坡在水平面内的形状, 可将其分为凸形、凹形和直线形, 边坡的空间形状对其稳定性无疑会产生影响^[19-21], 球冠型边坡属于轴对称圆形凹坡, 实际工程中通常不考虑边坡外形, 均按照直线形边坡考虑, 所得计算结果偏于保守^[22-23], 需重新确定其稳定性评价方法。

目前一般认为轴对称圆形凹形边坡稳定性优于直线形边坡, 原因是轴对称圆形凹坡的微单元扇形滑体侧面较直线形边坡多了一组侧面力, Zhang^[24]和 Zhang 等^[25]都将该侧面力按主动土压力取值, 从概念上分析轴对称圆形凹坡的微单元扇形滑体在滑动时侧面处于挤压状态, 更接近于被动土压力。黎莉等^[26]

对侧面力分别按照主动土压力、静止土压力、被动土压力三种情况进行分析,结果表明侧面实际压力状态处于静止土压力和被动土压力之间。

2 轴对称圆形凹坡的微单元扇形滑体侧面力

2.1 环形条块轴向力与外荷载的关系

根据极限平衡法划分条块的思路,将轴对称圆形凹坡滑体划分为若干个“环形条块”(图 2),环形条块向下滑动时会受到一个水平分力均布荷载 q_x , 荷载方向指向对称轴(图 3)。

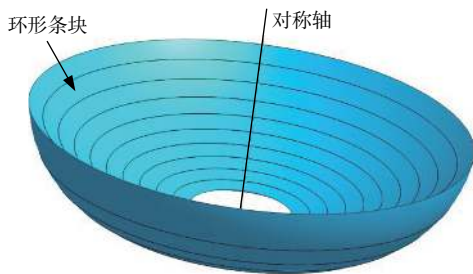


图 2 轴对称圆形凹坡划分环形条块

Fig. 2 Dividing annulus slices of the axisymmetric circular concave slope

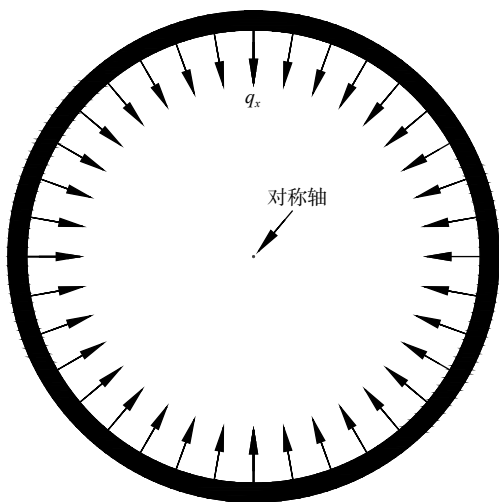


图 3 环形条块水平下滑分力

Fig. 3 Horizontal sliding component of annulus slices

取图 3 中环形条块的一段微单元扇形滑体作为分析对象(图 4)。微单元扇形滑体的曲率半径为环形条块的半径 R , 两侧面夹角为 $d\varphi$, 用 r 和 s 分别表示微单元扇形滑体的法线和切线方向, 则微单元扇形滑体弧长 $ds=Rd\varphi$ 。 s 和 r 方向的荷载集度分别为 q_s 和 q_r 。侧面弯矩为 M , 侧面剪力为 F_Q , 侧面轴向力为 F_N 。

由 $\Sigma F_s=0$ 得

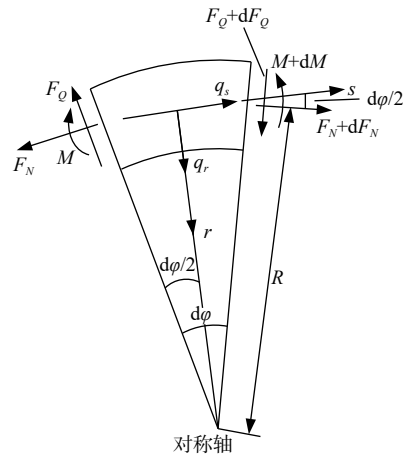


图 4 微单元扇形滑体受力图

Fig. 4 Free-body diagram of the tiny element sector sliding body

$$\begin{aligned} (F_N + dF_N) \cos \frac{d\varphi}{2} - F_N \cos \frac{d\varphi}{2} - \\ (F_Q + dF_Q) \sin \frac{d\varphi}{2} - F_Q \sin \frac{d\varphi}{2} + q_s ds = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

由于 $d\varphi$ 趋向于 0, 则 $\cos(d\varphi/2)=1$, $\sin(d\varphi/2)=d\varphi/2$, 忽略高阶微量后由式(1)得

$$dF_N - F_Q d\varphi + q_s ds = 0 \quad (2)$$

令 $ds=Rd\varphi$, 由式(2)整理得

$$\frac{dF_N}{ds} = \frac{F_Q}{R} - q_s \quad (3)$$

由 $\Sigma F_r=0$ 同理可得

$$\frac{dF_Q}{ds} = -\frac{F_N}{R} - q_r \quad (4)$$

由 $\Sigma M=0$ 得

$$dM - F_Q ds = 0$$

即

$$\frac{dM}{ds} = F_Q \quad (5)$$

由式(3)(4)(5)可知, 当 R 趋向于无穷时, 环形条块内力公式转变为直线形条块。

由于环形条块滑动时受到的水平分力 q_x 为均布荷载, 故切线荷载 $q_s=0$, 法向荷载 $q_r=q_x$ 。

设环形条块处于无弯矩状态, 即侧面弯矩 $M=0$, 侧面剪力 $F_Q=0$, 由式(4)可得

$$F_N = -Rq_x \quad (6)$$

2.2 微单元扇形滑体侧面力与水平抗滑力的关系

由式(6)可知, 当环形条块向下滑动时会在环形条块内产生一个轴向压力 F_N , F_N 即为微单元扇形滑体的侧面力, 且 F_N 为常数。如果可以确定环形条块轴向抗压能力 F_{Nmax} , 则可以得到一个水平荷载, 该水

平荷载方向背离对称轴, 起到抗滑作用, 属于抗滑力。

如图 4 所示, 假定极限平衡状态时, 微单元扇形滑体的大主应力 σ_1 方向为 s 切线方向, 小主应力 σ_3 方向为重力方向 (竖直方向), 则有:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_1}{2} \right) + 2c_1 \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_1}{2} \right) \quad (7)$$

考虑到边坡坡面凌空, 假设小主应力 $\sigma_3=0$, 则有:

$$\sigma_1 = 2c_1 \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_1}{2} \right) \quad (8)$$

$$F_{N\max} = 2c_1 \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_1}{2} \right) hl \cos \theta \quad (9)$$

式中: h ——微单元扇形滑体的高度;

l ——微单元扇形滑体的底面宽度;

θ ——微单元扇形滑体的底面与水平面夹角;

c_1 ——微单元扇形滑体的滑体黏聚力;

φ_1 ——微单元扇形滑体的滑体内摩擦角。

对于一般土体, 式(8)中的 σ_1 介于静止土压力和被动土压力之间, 符合文献 [26] 的结论。

取微单元扇形滑体 (图 5), 由式(6)可得 $F_{N\max}$ 产生的水平抗滑力 (T) 的计算公式:

$$T = \frac{F_{N\max}}{r} r d\varphi = F_{N\max} d\varphi \quad (10)$$

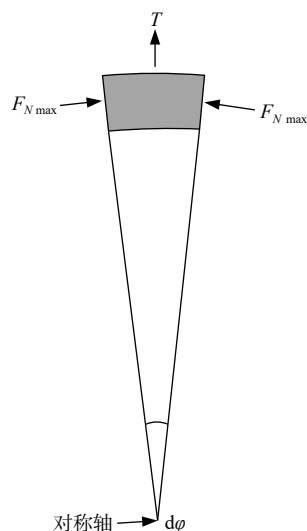


图 5 微单元扇形滑体抗滑力分析

Fig. 5 Sliding resistance force of the tiny element sector sliding body

计算大主应力 σ_1 时由于假定 $\sigma_3=0$, 对于坡面处的滑体部分较为合理, 但对于深处的滑体部分其 σ_3 不为 0, 故式(10)计算出的水平抗滑力偏小, 使得最终稳定性评价结果偏于保守。

3 基于极限平衡法的轴对称圆形凹坡稳定性评方法

3.1 改进简化 Bishop 法

将 2.2 节中介绍的水平抗滑力加入到任意极限平衡法中, 均可以使其适用于轴对称圆形凹坡稳定性评价, 这里以简化 Bishop 法为例进行公式推导。

取第 i 个环形条块的微单元扇形滑体 i , 将水平抗滑力 T_i 引入到简化 Bishop 法中, 假定水平抗滑力 T_i 作用在微单元扇形滑体 i 的重心上, 微单元扇形滑体 i 重心所在剖面的计算简图如图 6 所示。

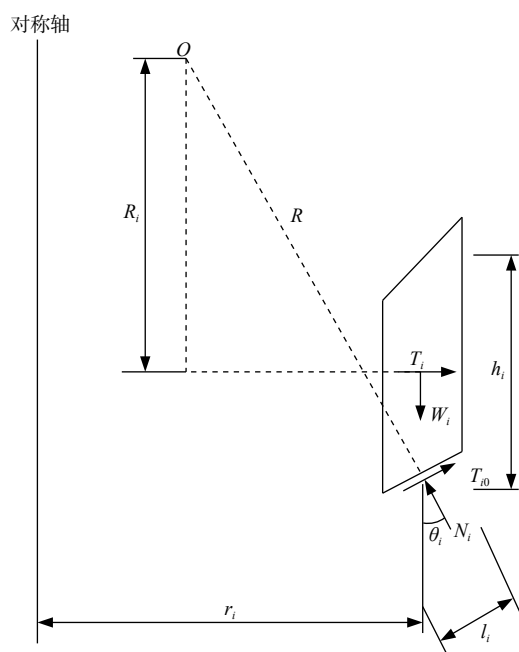


图 6 改进简化 Bishop 法计算简图

Fig. 6 Calculation diagram of the improved simplified Bishop method

由竖向合力 $\Sigma F_z=0$ 得

$$N_i = \frac{\gamma_i r_i d\varphi h_i l_i \cos \theta_i - T_{i0} \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \quad (11)$$

式中: γ_i ——微单元扇形滑体 i 的土体容重;

T_{i0} 、 N_i ——微单元扇形滑体 i 在滑面上的抗滑力和法向力;

r_i ——微单元扇形重心到对称轴的距离;

其余变量意义同前。

由力矩求和 $\Sigma M_O=0$ 得:

$$\Sigma \gamma_i r_i d\varphi h_i l_i \cos \theta_i R \sin \theta_i = \Sigma T_{i0} R + \Sigma T_i R_i \quad (12)$$

式中: R_i ——微单元扇形滑体 i 的水平抗滑力 T_i 到圆弧滑面圆心 O 的力矩;

R ——圆弧滑面半径。

由摩尔库伦强度准则并引入安全系数 F_s 可得 T_{i0} :

$$T_{i0} = \frac{1}{F_s} (c_{2i} r_i d\varphi l_i + N_i \tan \varphi_{2i}) \quad (13)$$

式中: c_{2i} ——微单元扇形滑体 i 的滑面黏聚力;

φ_{2i} ——微单元扇形滑体 i 的滑面内摩擦角;

其余变量意义同前。

将式(11)代入式(13)整理得:

$$T_{i0} = \frac{(c_{2i} r_i d\varphi l_i \cos \theta_i + \tan \varphi_{2i} \gamma_i r_i d\varphi h_i l_i \cos \theta_i)}{F_s \left(\cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \varphi_{2i}}{F_s} \right)} \quad (14)$$

将式(14)代入式(12), 约去 $d\varphi$ 整理得:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\theta i}} (c_{2i} r_i l_i \cos \theta_i + \gamma_i r_i h_i l_i \cos \theta_i \tan \varphi_{2i})}{\sum_{i=1}^n \gamma_i r_i h_i l_i \cos \theta_i \sin \theta_i + \frac{\sum_{i=1}^n T_i R_i}{R \sum_{i=1}^n \gamma_i r_i h_i l_i \cos \theta_i \sin \theta_i}} \quad (15)$$

$$m_{\theta i} = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \varphi_{2i}}{F_s} \quad (16)$$

$$T_i = 2c_{1i} \tan (45^\circ + \varphi_{1i}/2) h_i l_i \cos \theta_i \quad (17)$$

3.2 改进简化 Bishop 法验证

3.2.1 简化 Bishop 法和强度折减法对比

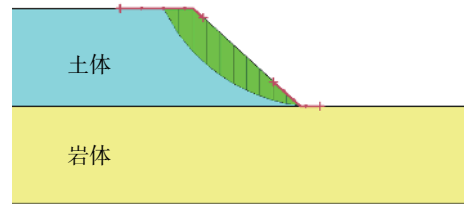
首先对有限元强度折减法和简化 Bishop 法在计算直线形边坡时安全系数的差异进行对比: 简化 Bishop 法采用 Geostudio, 自动搜索滑移面; 有限元强度折减法采用 Midas GTS NX。为控制有限元模型中滑移面为圆弧形, 模型分为基岩和土体两部分, 边坡高 10 m, 坡度 42.5°, 土体参数如表 1 所示, 所有土体均采用摩尔库伦强度准则, 安全系数及滑移面计算结果如图 7 所示。

表 1 10 m 高度边坡土体参数

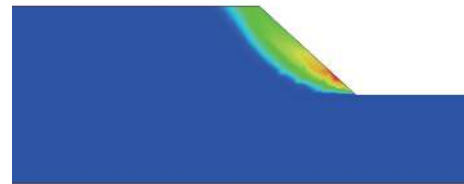
Table 1 Soil parameters of slope with a height of 10 m

土层	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
土体	20	15	30	100	0.35
岩体	26.51	1 500	35	10 000	0.2

由图 7 可以看出两种方法的滑移面基本一致, 但有限元强度折减法的安全系数计算结果略高于简化 Bishop 法^[27], 这主要是因为简化 Bishop 法有诸多假



(a) 自动搜索滑移面简化 Bishop 法 $F_s=1.497$



(b) 有限元强度折减法 $F_s=1.644$

图 7 简化 Bishop 法与强度折减法安全系数计算结果

Fig. 7 Safety factor of the simplified Bishop method and strength reduction method

定, 如未考虑土条间切向力、未考虑单个土条的力矩平衡等, 这些假定使得计算结果偏于保守。

3.2.2 改进简化 Bishop 法和强度折减法对比

建立图 7(b)模型的三维有限元模型(图 8), 坡脚到对称轴的距离 R_{bottom} 分别为 5, 10, 20 m。计算得到安全系数和滑移面后, 将滑移面提取并采用式(15)——(17)进行安全系数计算, 并将有限元强度折减法计算结果和式(15)——(17)的计算结果进行对比, 结果见图 9(a)。图中 H 为边坡高度, $H/R_{\text{bottom}}=0$ 表示直线形边坡; 同时将表 1 土体参数的黏聚力改为 10 kPa, 其余参数不变, 进行安全系数计算对比, 计算对比结果如图 9(b)所示。

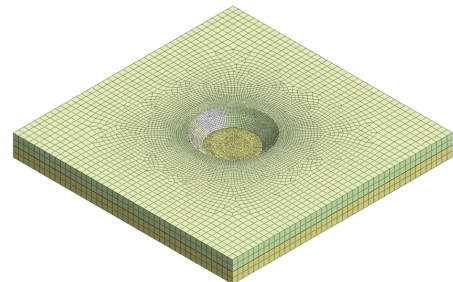
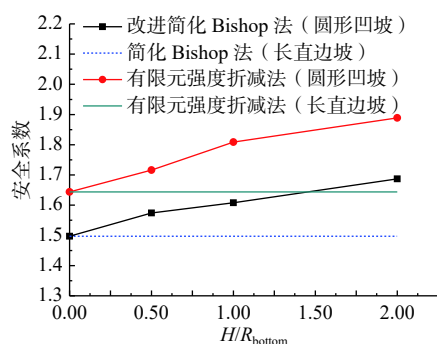


图 8 三维有限元模型 ($R_{\text{bottom}}=20 \text{ m}$)

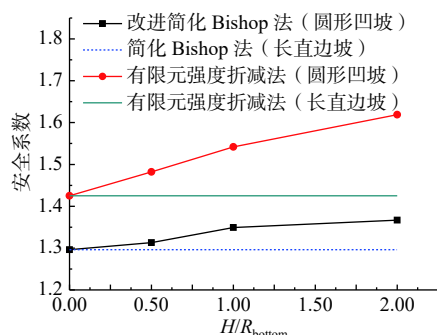
Fig. 8 Three-dimensional finite element model ($R_{\text{bottom}}=20 \text{ m}$)

另建立两组模型进行对比验证, 边坡模型高度为 30 m, 边坡坡度 60°, 土体参数如表 2 所示, 安全系数计算结果如图 10(a)所示。同时将表 2 土体参数的黏聚力改为 35 kPa 其余参数不变, 进行安全系数计算, 计算结果如图 10(b)所示。

由图 9 和图 10 可得, 有限元强度折减法安全系数



(a) 黏聚力 15 kPa



(b) 黏聚力 10 kPa

图 9 10 m 高轴对称圆形凹坡安全系数计算结果

Fig. 9 Safety factor of the axisymmetric circular concave slope with a height of 10 m

表 2 30 m 高度边坡土体参数
Table 2 Soil parameters of slope with a height of 30 m

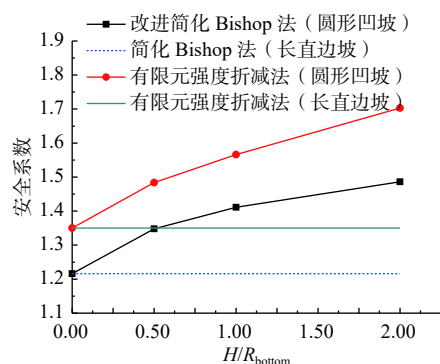
土层	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
土体	22	40	39.6	100	0.35
岩石	26.51	1 500	35	10 000	0.2

计算结果始终高于改进简化 Bishop 法且两条计算结果线段接近平行, 表明两种计算方法的安全系数差值基本保持一致, 改进简化 Bishop 法的计算公式较为可靠, 同时可以看出轴对称圆形凹坡的稳定性优于直线形边坡。

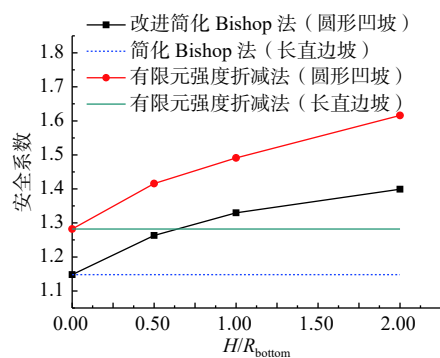
4 轴对称圆形凸坡的稳定性评价

轴对称圆形凸坡的安全系数计算公式可由式(15)~(17)变换得到, 当轴对称圆形凸坡的环形条块下滑时其轴向会产生一个拉力, 一般不考虑土体的抗拉强度, 则忽略式(17)得到适用于轴对称圆形凸坡的安全系数计算公式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\theta i}} (c_{2i} r_i l_i \cos \theta_i + \gamma_i r_i h_i l_i \cos \theta_i \tan \varphi_{2i})}{\sum_{i=1}^n \gamma_i r_i h_i l_i \cos \theta_i \sin \theta_i} \quad (18)$$



(a) 黏聚力 40 kPa



(b) 黏聚力 35 kPa

图 10 30 m 高轴对称圆形凹坡安全系数计算结果

Fig. 10 Safety factor of the axisymmetric circular concave slope with a height of 30 m

$$m_{\theta i} = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \varphi_{2i}}{F_s} \quad (19)$$

对式(18)(19)进行验证, 同样采用有限元强度折减法和改进简化 Bishop 法计算得到的安全系数结果进行对比。建立有限元模型, 土体单元采用表 2 中的土体参数, 边坡高度 20 m, 坡度为 70°, $R_{\text{bottom}}=20, 30, 40$ m 三种情况(图 11), 两种方法计算结果如图 12 所示。

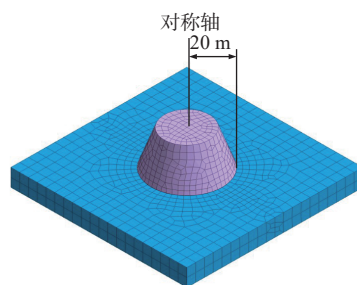


图 11 轴对称圆形凸坡三维有限元模型

Fig. 11 Three-dimensional finite element model of the axisymmetric circular convex slope

图 12 中两种方法安全系数计算结果比较接近, 式(18)(19)适用于轴对称圆形凸坡安全系数计算, 同时轴对称圆形凸坡的安全系数随半径的增大没有发生明显变化, 与传统概念中凸坡的稳定性差有所出入。

这主要是因为上部环形条块周长要小于下部环形条块,即上部滑体的体积较小而下部滑体的体积大,这种情况对抗滑移是有利的,凸坡安全系数未必就比直线形边坡小^[22]。

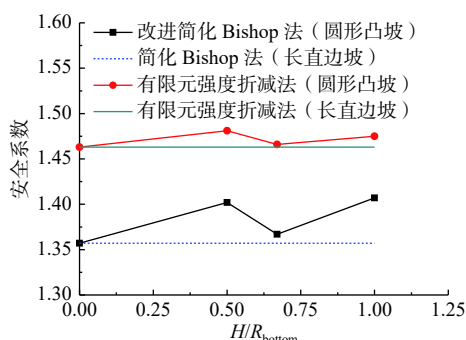


图 12 轴对称圆形凸坡安全系数计算结果

Fig. 12 Safety factor of the axisymmetric circular convex slope

5 结论

(1)轴对称圆形凹坡侧面力取值可以按照微单元扇形滑体小主应力为零时的大主应力进行取值。

(2)考虑侧面力取值后对极限平衡法进行改进,提出改进后的简化 Bishop 法安全系数计算公式,改进后的公式计算结果与数值分析结果基本一致。

(3)假定土体抗拉强度为零,提出了圆形凸坡安全系数计算方法与公式,计算结果表明圆形凸坡安全系数与长直边坡接近。

参考文献 (References) :

- [1] FELLENIUS W. Erdstatische berechnungen[M]. Berlin: Ernst and Sohn, 1927.
- [2] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique, 1955, 5(1): 7 – 17.
- [3] JANBU N. Slope stability computations[C]// Proceedings of embankment dam engineering. New York: John Wiley & Sons, 1973: 47-86.
- [4] 郑颖人, 杨明成. 边坡稳定安全系数求解格式的分类统一[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2836 – 2841. [ZHENG Yingren, YANG Mingcheng. Classification unification of calculation formulation for safety factor of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2836 – 2841. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 麻官亮, 邵玉刚. 基于 Spencer 法的三维极限平衡边坡稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 118 – 123. [MA Guanliang, SHAO Yugang. Study on three-dimensional limit equilibrium for slope stability based on Spencer method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 118 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [6] DRUCKER D C, PRAGER W, GREENBERG H J. Extended limit design theorems for continuous media[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, 9(4): 381 – 389.
- [7] DRUCKER D C, PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, 10(2): 157 – 165.
- [8] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1975.
- [9] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 1 – 11. [CHEN Zuyu. Limit analysis for the classic problems of soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 1 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 闫金凯, 马娟, 冯春. FAST 台址巨石混合体边坡开挖稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 25 – 29. [YAN Jinkai, MA Juan, FENG Chun. Stability analysis of large rock mixture slope under excavation in FAST location[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 25 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1 – 7. [SONG Erxiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈晓洋, 张宏阳, 冀东, 等. 重庆某不稳定斜坡变形监测及稳定性分析[J]. 地质力学学报, 2011, 17(4): 402 – 409. [CHEN Xiaoyang, ZHANG Hongyang, JI Dong, et al. Deformation monitoring and stability analysis of an unstable slope in Chongqing City[J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17(4): 402 – 409. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 邓琴, 郭明伟, 李春光, 等. 基于边界元法的边坡矢量和稳定分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1971 – 1976. [DENG Qin, GUO Mingwei, LI Chunguang, et al. Vector sum method for slope stability analysis based on boundary element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1971 – 1976. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 侯连成, 王笑二, 王家伟, 等. 基于强度折减法的某变电所边坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2012,

- 39(1): 72 - 74. [HOU Liancheng, WANG Xiaoer, WANG Jiawei, et al. Slope stability analysis for a substation based on strength reduction[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 72 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(3): 343 - 346. [ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 343 - 346. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈子玉, 宋彦辉, 严豪, 等. 双参数强度折减法研究中存在的问题分析[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 125 - 132. [CHEN Ziyu, SONG Yanhui, YAN Hao, et al. Analyses of the existing problems in the double parameters reduction method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 125 - 132. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 徐明, 宋二祥, 沈志平, 等. FAST大型岩溶洼地场地岩土治理关键技术研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(3): 87 - 99. [XU Ming, SONG Erxiang, SHEN Zhiping, et al. Key techniques in geotechnical treatment of a large karst depression for FAST[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(3): 87 - 99. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘蕾, 闫金凯, 陈亮, 等. 巨石混合体力学性质的数值试验分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(1): 108 - 114. [LIU Lei, YAN Jinkai, CHEN Liang, et al. Numerical simulation on mechanical characteristics of large rock fragment mixture[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2014, 25(1): 108 - 114. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王家臣, 杜竞中. 水平凸型边坡破坏分析[J]. *中国矿业大学学报*, 1992, 21(2): 102 - 108. [WANG Jiachen, DU Jingzhong. The failure analysis of horizontal convex earth slopes[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1992, 21(2): 102 - 108. (in Chinese with English abstract)]
- [20] BAKER R, LESHCHINSKY D. Stability analysis of conical heaps[J]. *Soils and Foundations*, 1987, 27(4): 99 - 110.
- [21] FARZANEH O, ASKARI F, GANJIAN N. Three-dimensional stability analysis of convex slopes in plan view[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(8): 1192 - 1200.
- [22] 沈志平, 宋二祥, 朱博勤, 等. FAST开挖系统关键技术及安全性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [SHEN Zhiping, SONG Erxiang, ZHU Boqin, et al. Study on key technology and safety of the FAST excavation system[M]. Beijing: Science Press, 2018.(in Chinese)]
- [23] 赵衡, 宋二祥. 圆形凸坡的稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(5): 730 - 737. [ZHAO Heng, SONG Erxiang. Stability analysis of circular convex slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(5): 730 - 737. (in Chinese with English abstract)]
- [24] ZHANG X. Three - dimensional stability analysis of concave slope in plan view[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(6): 658 - 671.
- [25] ZHANG T W, CAI Q X. 3D stability analysis method of concave slope based on the Bishop method[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27: 365 - 370.
- [26] 黎莉, 刘子儒. 凹型边坡稳定性分析中的侧面力取值方法探讨[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增刊2): 137 - 141. [LI Li, LIU Ziru. Method for lateral forces in stability analysis of concave slopes in plan view[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup2): 137 - 141. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. *水利学报*, 2003, 34(1): 21 - 27. [ZHANG Luyu, ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(1): 21 - 27. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华