

DOI: 10.11779/CJGE2018S2034

基于结构面网络模拟技术的边坡楔形体分析方法研究

马淑芝, 贾洪彪*, 张致能, 张志飞

(中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 山区高速公路的建设日益增多, 岩质高边坡越来越多地出现于工程建设之中。对于完整性较好的岩质边坡, 楔形体破坏是常见的边坡破坏类型之一。由于楔形体数量多, 规模及稳定性都差别较大, 位置也不固定, 在勘探过程中难以确定, 给边坡稳定性分析及设计带来很大不便。依据楔形体几何结构条件, 将楔形体分成I型(出现于坡肩, 由两条相交的结构面与坡顶、坡面共同包围形成)和II型(出现于坡面, 由三条结构面与坡面共同包围形成), 利用结构面三维网络模拟技术, 对岩质边坡工程中楔形体进行随机分析和分步筛选, 发展了搜索楔形体及其稳定性评价方法, 用以指导边坡评价、设计和加固治理, 并在厦沙高速的边坡稳定性分析中尝试应用。结果表明: 对于岩质边坡, 可根据楔形体的几何构成条件, 利用楔形体分析方法, 可以从岩体三维结构数字模型中抽取楔形体, 并进行楔形体稳定性分析; 通过I型楔形体和II型楔形体的对比, 当边坡坡高较大时, II型楔形体数量远远大于I型楔形体, 因此应更重视对II型楔形体的研究。

关键词: 楔形体; 岩质边坡; 结构面网络模拟; 稳定性; I型楔形体; II型楔形体

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0167-06

作者简介: 马淑芝(1974-), 女, 教授, 博士, 主要从事岩土力学与岩土测试技术等方面的教学和科研工作。E-mail: maszy@163.com。

Stability analysis of wedges of rock slopes based on 3D network simulation of structural surface

MA Shu-zhi, JIA Hong-biao, ZHANG Zhi-neng, ZHANG Zhi-fei

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: High rock slopes in mountainous areas are increasingly encountered with the construction of expressways. As one of frequently observed stability issues of high rock slopes, wedge failure differs greatly in scale and stability as well as location distribution. Such characteristics cause significant difficulty in the slope stability analysis during exploration and the subsequent project design. According to their geometric structure, the wedges are divided into two types: I-type wedges on the slope shoulder and surrounded by two intersecting structural surfaces, top and slope surface, and II-type wedges on the slope surface and surrounded by three structural planes and slopes. By means of the three-dimensional network simulation technology of structural surface, the random analysis and step-by-step screening of wedges in rock slope engineering are carried out. The methods for searching wedges and evaluating their stability are developed to guide the evaluation, design and reinforcement of slopes. The applicability of this developed method is demonstrated by a case study, the practical application in Xiamen-Shaxian Expressway. The research results demonstrate that for the wedge analysis of rock slopes, it is possible to draw wedges from the 3D structural digital model for rock mass and analyze their stability based on the three-dimensional network simulation technology of structural surface. Comparison of I-type and II-type wedges indicates that when the slope is higher, the number of II-type wedges is far greater than that of I-type ones, therefore, the II-type wedges cannot be ignored in the slope projects.

Key words: wedge; rock slope; network simulation of structural surface; stability; I-type wedge; II-type wedge

0 引言

对于完整性较好的岩质边坡, 其破坏类型和方式多由结构面组合及坡体结构所决定^[1-2], 楔形体破坏是最常见的方式之一。楔形体不仅数量多, 而且规模及稳定性都差别较大, 出现的位置也不固定, 因而

在勘探过程中难以具体确定, 对于边坡稳定性分析及设计带来很大不便。本文依据楔形体几何结构条件,

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41572278)

收稿日期: 2018-07-22

*通讯作者(E-mail: jiahongbiao@cug.edu.cn)

基于结构面三维网络模拟技术^[3], 对岩质边坡工程中楔形体的出现进行随机分析, 以指导边坡评价、设计和加固治理。

1 楔形体几何结构条件

楔形体在空间形态上看为一四面体, 由四个相交切的面围限而成, 根据楔形体出现的位置及围限条件, 可以分为两种类型: 一类出现于坡肩, 如图 1(a) 所示, 由两条相交的结构面 (ABC 和 ADC) 与坡顶、坡面共同包围形成。它是通常意义上所说的楔形体, 本文称其为 I 型楔形体; 另一类出现于坡面, 如图 1

(b) 所示, 由三条结构面 (ABC、ADC 和 ABD) 与坡面共同包围形成。其中, 结构面 ABD 多为缓倾角, 主要起到切割面的作用 (本文称其为楔形体顶面), 主滑面依然为结构面 ABC 和 ADC, 本文称其为 II 型楔形体。II 型楔形体不是通常所言楔形体, 可以视为一种特殊的楔形体。

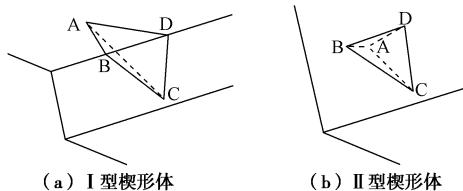


图 1 楔形体类型

Fig. 1 Types of wedges

1.1 I型楔形体的构成条件

I 型楔形体由两条结构面与坡面、坡顶共同组合而成, 结构面必须满足以下条件: ①结构面倾向相反; ②结构面相交, 且交线同时在坡顶、坡面出露; ③结构面交线倾向坡外; ④结构面均与坡肩相交。

1.2 II型楔形体的构成条件

II 型楔形体由三条结构面与坡面共同组合而成, 结构面必须满足以下条件: ①两主滑结构面倾向相反; ②两主滑结构面相交, 交线在坡面出露; ③两主滑结构面交线倾向坡外; ④上部有一条缓倾角结构面同时与两主滑面相切割, 与坡面共同构成分离块体。

2 岩质边坡结构面三维网络模拟与楔形体随机搜索方法

2.1 边坡岩体结构面三维网络模拟

楔形体从结构条件看是一个空间几何课题, 不仅与坡面结构面发育有关, 而且与坡内结构面组合有关。目前研究岩体内结构面发育特征最有效的方法是结构面三维网络模拟技术^[7]。该方法是在现场测量的基础上, 基于结构面随机发育特征, 采用 Monte Carlo 方法模拟与实际分布在统计学特征上相似的结构面三维

网络, 获得其数字模型, 供工程分析所使用^[4-12]。

结构面网络三维模拟主要步骤为^[13-14]: ①结构面野外采样。按照统计要求, 采集足够量的结构面样本数据, 常用精测线法和统计窗法。②对结构面分组及建立结构面概率模型。结构面发育具随机性, 其各项几何特征参数都遵循一定的概率分布形式, 根据样本数据可以分析各组结构面的概率分布特征, 建立结构面概率模型。③获得结构面三维网络数字模型及图像。采用 Monte Carlo 随机模拟方法生成与结构面概率模型要求一致的随机数序列, 便得到结构面三维数字模型及网络图 (图 2)。

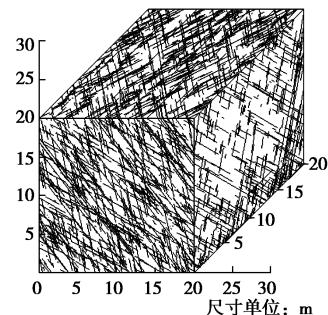


图 2 结构面网络三维图

Fig. 2 3-D discontinuity network

2.2 楔形体搜索方法

利用边坡结构面三维数字模型, 则可以根据楔形体构成条件, 依据对结构面进行筛选及几何组合分析, 凡符合楔形体几何构成条件的楔形体, 均可以逐一搜索出来。其分析流程见图 3。

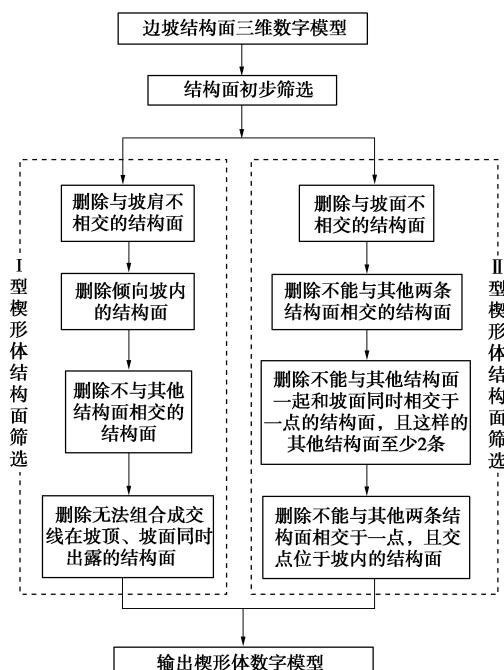


图 3 楔形体分析流程框图

Fig. 3 Flow diagram of wedge analysis

3 楔形体稳定性验算

上述方法所确定楔形体包含了几何形态上满足条件的所有岩石块体, 而工程上最受关注的是那些稳定性差、安全储备不足的楔形体。可通过稳定性验算, 进一步筛选出关键楔形体。

由于结构面抗拉强度较低, 为安全起见, 在稳定性分析中, 对于作为 II型楔形体顶面的结构面 ABD, 可不考虑其抗拉能力。因此两种类型楔形体稳定性验算方法是一样的。

假设楔形体顶点分别为 A、B、C 和 D, 其受力如图 4 所示。

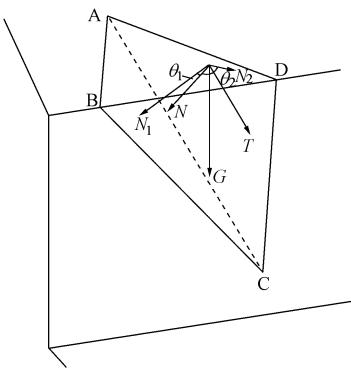


图 4 楔形体受力示意图

Fig. 4 Schematic graph of force acting on a wedge

假设滑面 $\triangle ABC$ 和 $\triangle ADC$ 倾向分别为 α_1 和 α_2 , 倾角分别为 β_1 和 β_2 。根据点 A (x_1, y_1, z_1) 和点 C (x_2, y_2, z_2) 的坐标, 交线 AC 的倾伏角 β 及矢量余弦 $I_{AC}=\{l_{AC}, m_{AC}, n_{AC}\}$ 为:

$$\sin \beta = \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} , \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{AC} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \\ m_{AC} = \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \\ n_{AC} = \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \end{array} \right. . \quad (2)$$

楔形体沿交线 AC 滑动。在仅考虑楔形体自重 G 时, 则垂直交线分量为 $N=G\cos \beta$, 平行交线分量为 $T=G\sin \beta$, T 即为滑动力。

为了计算两滑面上的抗滑力, 应将 N 投影到 $\triangle ABC$ 和 $\triangle ADC$ 的法线方向上。矢量 N 与 AC 垂直且在同一竖直平面内, 由 AC 矢量余弦 I_{AC} 可得到 N 的矢量余弦 $I_N=\{l_N, m_N, n_N\}$, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} l_N = -\frac{l_{AC}n_{AC}}{\sqrt{1-n_{AC}^2}} \\ m_N = -\frac{m_{AC}n_{AC}}{\sqrt{1-n_{AC}^2}} \\ n_N = \sqrt{1-n_{AC}^2} \end{array} \right. . \quad (3)$$

$\triangle ABC$ 和 $\triangle ADC$ 的法线矢量可以由结构面产状计算得到。这样就可以得到结构面法线和 N 矢量的夹角, 从而将 N 分解到 $\triangle ABC$ 和 $\triangle ADC$ 上, 得到其分量 N_1 和 N_2 。

设 c_1, c_2 及 ϕ_1, ϕ_2 分别为滑面 $\triangle ABC$ 和 $\triangle ADC$ 的黏聚力和内摩擦角, 则总抗滑力 F_s 为

$$F_s = N_1 \tan \phi_1 + N_2 \tan \phi_2 + c_1 S_{\triangle ABC} + c_2 S_{\triangle ADC} . \quad (4)$$

所以, 楔形体的稳定性系数 η 为

$$\eta = \frac{N_1 \tan \phi_1 + N_2 \tan \phi_2 + c_1 S_{\triangle ABC} + c_2 S_{\triangle ADC}}{G \sin \beta} . \quad (5)$$

式中 $S_{\triangle ABC}$ 和 $S_{\triangle ADC}$ 分别为 $\triangle ABC$ 和 $\triangle ADC$ 面积; G 为楔形体重量, 按下式计算:

$$G = \rho V = \frac{\rho}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix} , \quad (6)$$

式中, ρ 为岩体密度, (x_1, y_1, z_1) 为 A 点坐标, (x_2, y_2, z_2) 为 C 点坐标, (x_3, y_3, z_3) 为 B 点坐标, (x_4, y_4, z_4) 为 D 点坐标。

根据边坡级别及实际工况, 可依据相关规范规定选择边坡稳定性评价的稳定安全系数, 若楔形体稳定性系数小于稳定安全系数, 则被评为不稳定楔形体。

4 工程实例

4.1 边坡结构面概率模型

工程实例位于尤溪县境内, 边坡开挖最大坡高 78.5 m, 设计为九级, 每级边坡高 8 m, 碎落台宽度 1.8~6 m 不等。上部六级边坡坡比为 1:1.25, 下部三级边坡为 1:1.0。

构成边坡的岩石主要为前震旦系云母石英片岩。片理发育, 云母定向排布明显, 石英呈条带状集合体沿片理方向分布。片理产状 115°~130° / 40°~45°, 总体倾向。

岩体内发育两组主要节理, 为建立边坡结构面概率模型, 采用精测线法统计了 240 条节理数据, 其玫瑰花图见图 5。根据动态聚类分析, 两种节理的优势产状分别为 82° / 64° 和 182° / 75°。

图 6 为第 1 组节理几何参数分布直方图, 可以看出节理间距接近于负指数分布, 倾向接近于正态分布, 倾角接近于对数正态分布, 迹长接近于均匀分布。

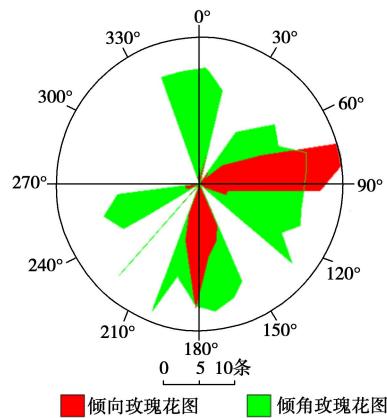


图 5 节理倾向、倾角玫瑰花图

Fig. 5 Rose diagram of joint inclination and dip angle

根据现场调查统计, 片理产状稳定, 延伸较长, 其间距服从正态分布, 据此确定出节理及片理面概率分布模型, 见表 1。

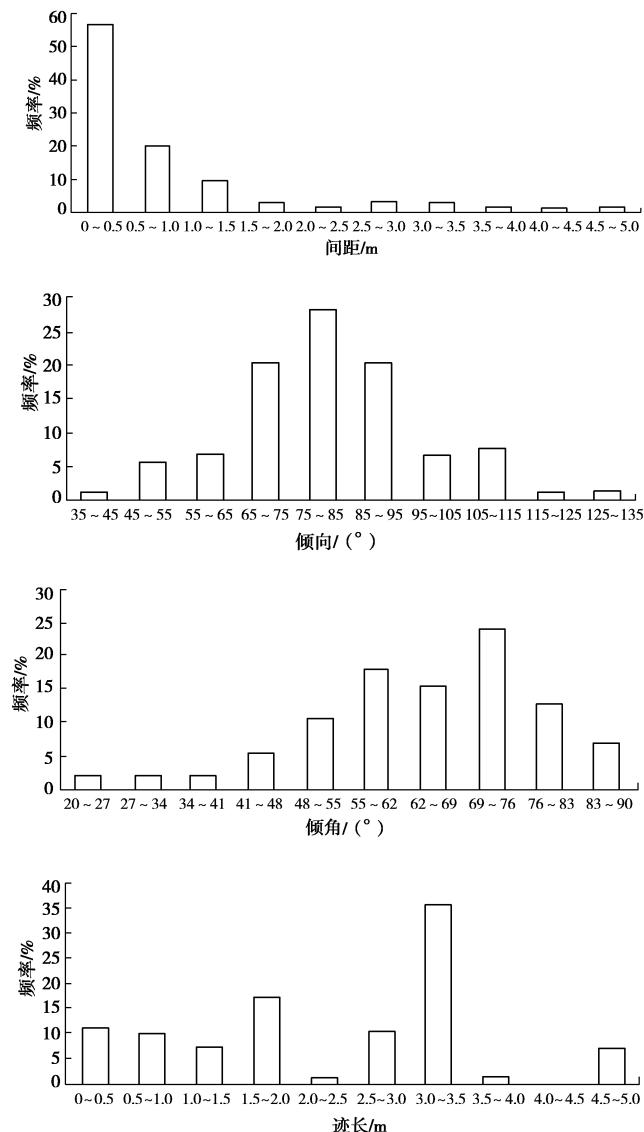


图 6 第 1 组节理参数直方图

Fig. 6 Histograms of first set of joint parameters

表 1 结构面分组概率特征

Table 1 Grouping probability feature of structural surface of rock

分组	节理 1	节理 2	片理层面
倾向	均值	82.0	182.0
	方差	16.4	14.4
	分布规律	正态	正态
倾角	均值	64.7	75.0
	方差	14.4	9.26
	分布规律	对数正态	对数正态
半迹长	均值	2.55	2.16
	方差	1.29	1.25
	分布规律	均匀	均匀
间距	均值	0.78	0.85
	方差	0.92	0.89
	分布规律	负指数	负指数

根据室内实验及岩体分级综合研究, 结构面内摩擦角取 28° 、黏聚力取 60 kPa , 岩体密度取 2.55 g/cm^3 。根据边坡级别及工况条件, 依据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015), 稳定安全系数取 1.15。

4.2 楔形体搜索结果分析

根据表 1 所示概率模型, 采用自行编制的模拟程序得到边坡岩体结构面三维网络图见图 7。图 7 所模拟边坡走向、坡度与实际边坡相同, 为节省模拟空间和运算时间, 模拟边坡长度为 10 m, 坡高 18 m, 超过该九级边坡任意单一级别的边坡高度, 可以供楔形体分析所用。

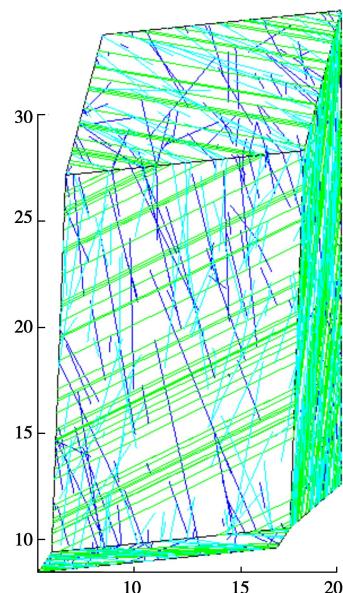


图 7 边坡结构面网络图

Fig. 7 Structural surface network of slope

根据上述搜索方法, 针对图 7 所示模型, 可以得到该段边坡中存在不稳定 I 型楔形体 3 个, 平均每 3.3 m 长度 1 个, 存在不稳定 II 型楔形体 41 个, 平均 3.5 m^2 一个。

不稳定楔形体分布图见图 8, 基础数据见表 2。

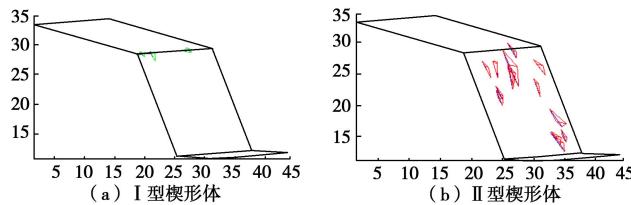


图 8 搜索获得的不稳定楔形体

Fig. 8 Unstable wedges obtained by searching

表 2 不稳定楔形体及其稳定性系数

Table 2 Unstable wedges and their stability coefficients

类型	编号	交线倾角 /(°)	体积 /m ³	最大厚度 /m	稳定性 系数
I型	1	58.9	0.11	0.55	0.7
	2	39.9	0.12	0.77	1.0
	3	53.3	0.20	1.00	1.1
II型	1	50.8	0.18	1.4	1.0
	2	50.8	0.18	1.4	1.0
	3	50.8	0.18	1.4	1.0
	4	50.8	0.18	1.4	1.0
	5	50.7	0.13	1.4	0.9
	6	50.7	0.13	1.4	0.9
	7	53.9	0.13	0.8	0.8
	8	53.9	0.13	0.8	0.8
	9	53.1	0.20	1.5	0.9
	10	53.1	0.20	1.5	0.9
	11	50.8	0.26	1.6	1.0
	12	50.8	0.26	1.6	1.0
	13	50.7	0.13	1.4	0.9
	14	50.7	0.13	1.4	0.9
	15	48.6	0.12	1.8	1.1
	16	48.6	0.12	1.8	1.1
	17	45.8	0.38	2.5	0.8
	18	45.8	0.38	2.5	0.8
	19	57.0	2.12	2.9	0.7
	20	57.0	2.12	2.9	0.7
	21	60.6	0.43	1.4	0.7
	22	57.5	0.44	1.6	0.7
	23	57.0	0.42	1.7	0.8
	24	57.0	0.42	1.7	0.8
	25	60.6	0.43	1.4	0.7
	26	57.5	0.44	1.6	0.7
	27	52.1	0.11	0.7	0.7
	28	52.1	0.11	0.7	0.7
	29	52.1	0.11	0.7	0.7
	30	52.1	0.11	0.7	0.7
	31	69.3	0.10	0.6	0.6
	32	64.0	0.11	0.8	0.7
	33	59.3	0.11	0.9	0.8
	34	60.6	0.49	1.4	0.7
	35	57.5	0.51	1.7	0.7
	36	57.0	0.50	1.8	0.8
	37	57.0	0.50	1.8	0.8
	38	69.3	0.10	0.6	0.6
	39	60.6	0.49	1.4	0.7
	40	64.0	0.11	0.8	0.7
	41	57.5	0.51	1.7	0.7

图 9 与图 10 分别为不稳定楔形体体积与厚度(顶点到坡面的距离)的直方图。可以看出: 坡肩和坡面均会出现楔形体, 体积都很小, 一般小于 0.6 m^3 , 极

少数大于 2.0 m^3 , 最大 2.12 m^3 , 不具备大体积楔形体出现的条件, 楔形体厚度以 $0.6\sim1.8 \text{ m}$ 为主, 少数超过 2.5 m , 最大 2.9 m , 总体上属于一些小型的分离块体。

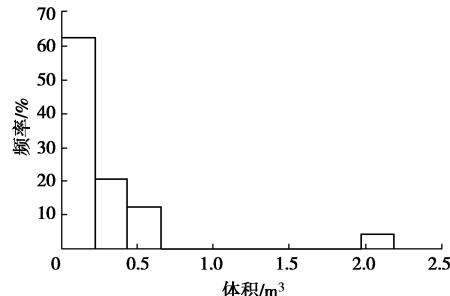


图 9 不稳定楔形体体积分布直方图

Fig. 9 Column diagram of volume of wedges

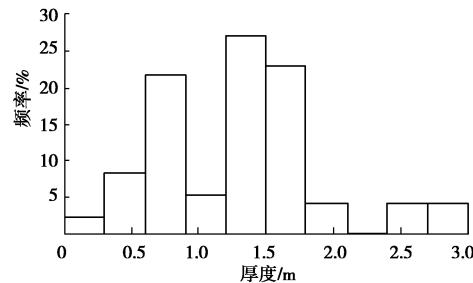


图 10 不稳定楔形体厚度分布直方图

Fig. 10 Column diagram of width of wedges

5 结 论

通过上述研究, 可以得出以下结论:

(1) 楔形体由于不同的出露位置及围限条件, 可以分为 I 型和 II 型两种类型, 其几何构成条件不同。

(2) 岩质边坡的楔形体分析, 可以依托结构面三维网络模拟技术, 根据楔形体构成条件, 从岩体三维结构数字模型中抽取楔形体, 分析其稳定性, 指导边坡的设计与加固。

(3) 对比 I 型楔形体和 II 型楔形体可以发现, 当边坡坡高较大时, II 型楔形体数量远远大于 I 型楔形体, 因此, 在平时的工作中不能忽略 II 型楔形体。

(4) 边坡结构面发育情况决定了楔形体的存在情况。对于工程实例, 楔形体体积一般小于 0.6 m^3 , 极少数大于 2.0 m^3 , 不具备大体积楔形体出现的条件。楔形体最大厚度(顶点到坡面的距离)为 2.9 m , 属于一些小型分离的可动块体, 可采用表层加固措施进行加固。

参考文献:

- [1] 徐卫亚, 狄圣杰, 郑文棠, 等. 白鹤滩水电站上坝线左拱座楔形体安全性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,

- [30(5): 910 – 916. (XU Wei-ya, DI Sheng-jie, ZHENG Wen-tang, et al. Safety performance analysis of rock wedges under left skewback of upstream dam line in Baihetan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 910 – 916. (in Chinese))]
- [2] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. (SUN Guang-zhong. Rock mass structure mechanics[M]. Beijing: Sciences Press, 1988. (in Chinese))]
- [3] 张发明, 何传永, 贾志欣, 等. 基于三维裂隙网络模拟的随机楔体稳定分析[J]. 水力发电, 2002(7): 15 – 18, 76. (ZHANG Fa-ming, HE Chuan-yong, JIA Zhi-xin, et al. Three dimensional network simulation on fissures and the stability analysis on random wedge blocks[J]. Water Power, 2002(7): 15 – 18, 76. (in Chinese))]
- [4] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣. 岩体结构面网络模拟技术研究进展[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 103 – 108. (JIA Hong-biao, TANG Hui-ming, LIU You-rong. Advances in the study of rock discontinuity network modeling technique[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 103 – 108. (in Chinese))]
- [5] 杨超, 徐光黎, 申艳军, 等. 基于结构面网络模拟的节理岩质边坡可靠性分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1221 – 1226. (YANG Chao, XU Guang-li, SHEN Yan-jun, et al. Joint network simulation based reliability analysis for jointed rock slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1221 – 1226. (in Chinese))]
- [6] 林鹏, 石杰, 周华, 等. 乌东德坝肩结构面影响及协调加固稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3937 – 3946. (LIN Peng, SHI Jie, ZHOU Hua, et al. Stability analysis on structural plane effects and compatible reinforcement relating to Wudongde dam abutments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3937 – 3946. (in Chinese))]
- [7] ZHENG J, KULATILAKE P H S W, DENG J H, et al. Development of a probabilistic kinematic wedge sliding analysis procedure and application to a rock slope at a hydropower site in China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(4): 1413 – 1428.
- [8] PRIEST S D. Discontinuity analysis for rock engineering[M]. Chapman & Hall, 1993.
- [9] 刘明, 黄润秋, 严明, 等. 倾斜面上岩体结构面加权节理密度的获取[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 1975 – 1989. (LIU Ming, HUANG Runqiu, YAN Ming, et al. Determination of weighted joint density from inclined surface observations in rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 1975 – 1989. (in Chinese))]
- [10] MAULDON M E. Estimating fracture mean trace and density from observations in convex windows[J]. Rock Mech Rock Eng, 1998, 31(4): 201 – 216.
- [11] 左育龙, 朱合华, 李晓军. 最大熵在岩体结构面间距分布估计中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3492 – 3498. (ZUO Yu-long, ZHU He-hua, LI Xiao-jun. Estimation of rock mass discontinuity spacing distributions using maximum entropy principle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3492 – 3498. (in Chinese))]
- [12] NGUYEN A T, MERRIEN-SOUKATCHOFF V, VINCHES M, et al. Grouping discontinuities in representative sets: influence on the stability analysis of slope cuts[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(4): 1429 – 1444.
- [13] JIA Hong-biao, MA Shu-zhi. Study on the application of 3-D discontinuity network modeling in geotechnical engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 457 – 458.
- [14] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣, 等. 岩体结构面三维网络模拟理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (JIA Hong-biao, TANG Hui-ming, LIU You-rong, et al. Three dimensional network simulation theory and engineering application of rock mass discontinuities[M]. Beijing: Sciences Press, 2008. (in Chinese))]

(本文责编 明经平)