马氏距离判别法对边坡潜在破坏类型分析

----以某石灰石矿山为例

吴占廷

(西北综合勘察设计研究院贵阳分院,贵州 贵阳 550001)

[摘 要]距离判别法在社会科学领域得到了广泛的应用,近年来在岩土工程领域进行了一些尝试。岩小明、周成豪等应用马氏距离判别法基于岩体抗压强度、边坡结构面倾角、结构面和边坡位置关系、岩体结构类型、岩体或结构面抗剪强度、边坡高度和边坡角对 23 露天矿边坡破坏类型研究,发现有其良好的相关性,得到三种破坏类型的判别函数。本次利用周成豪(2020)建立的判别函数对丽江古城某石灰石矿山边坡破坏类型进行检验,并采用 Monte Carlo 进行二维结构面网络模拟及迪杰斯特拉(Dijkstra)算法搜索边坡破坏类型进行对比。发现两者判断结果对边坡整体破坏类型具有较好的一致性,但J₃节理结构面判别可能发生平面滑动破坏与沿层面、J₁、J₂节理发生折线滑动破坏不一致,表明边坡破坏的复杂性及马氏距离判别法的适用性还需要加强。

[关键词]马氏距离判别法;潜在破坏类型;露天边坡;结构面 [中图分类号]P694 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2023)01-43-06

1 引言

判别分析法是 Pearson 于 1921 年首先提,由于 该判别法对原始数据分布并无特殊要求,非常适合 事先不知道样本分布的情况,在自然科学和社会科 学的各个领域得到广泛应用。距离判别分析法是 一种应用性很强的多元统计方法,根据已有样本的 数据信息,总结出客观事物分类的规律性,建立判 别函数和判别准则,遇到新样本时,根据已得的判 别准则和判别函数式,就能判别该样本的类别(范 金城等,2002;高惠璇,2005)。近年来一些学者用 距离判别法在岩土工程领域进行了一些尝试,彭刚 剑等利用距离判别法对采空区塌陷预测进行研究 (彭刚剑等,2009),王文川等利用距离判别法对山 洪泥石流预报进行研究(王文川等,2013);部分学 者应用于岩爆评价(宫凤强,2007;朱卓慧等,2008; 王晋等,2011;罗磊等,2012);改进距离判别法应用 于 TBM 施工围岩分级及岩体质量分级(闫长斌,路 新景,2017;张彪,2017);朱卓慧应用于急倾斜煤层 放煤巷道稳定性分类(朱卓慧,2010),闫长斌等将 其应用于边坡稳定性评价(闫长斌,2016;戴兴国 等,2018);陈永春应用距离判别法在矿井突水水源 进行判别(陈永春等,2014);岩小明等将其应用于 露天矿边坡破坏模式研究(岩小明,2012,2013;周 成豪,2020)。

马氏距离既能排除各指标之间相关性的干扰,又不受各指标量纲的影响,任意2点之间的马 氏距离与原始数据的测量单位无关,即原始数据 与均值之差计算出的任意2点之间的马氏距离相 同。马氏距离还可以排除变量之间的相关性的干 扰。本文利用周成豪(2020)根据冯夏庭《智能岩 石力学》一书中的23个边坡工程样本判别准则和 判别函数,对丽江古城某石灰石矿山边坡破坏类

[[]收稿日期]2022-10-28 [修回日期]2023-01-31

[[]作者简介]吴占廷(1988—),男,贵州石阡人,本科,工程师,主要从事地质工程勘察设计。e-mail:1031782691@qq.com。

型进行判别,并采用 Monte Carlo 随机模拟方法模 拟二维结构面网络模拟,采用迪杰斯特拉 (Dijkstra)算法搜索边坡破坏类型进行对比验证。 结合表明马氏距离判别法建立的判别函数对新样 本的判别具有一定的参考价值,可以利用于大型 复杂高边坡的破坏类型判断。

2 马氏距离判别法基本原理

马氏距离是由印度统计学家马哈拉诺比斯 (Mahalanobis)于1936提出,在多元统计分析中起 着十分重要的作用。根据已有样本的数据信息, 总结出客观事物分类的规律性,建立判别函数和 判别准则,遇到新样本时,根据已得的判别准则和 判别函数式,就能计算该样本到各总体的马氏距 离,通过比较从而得到马氏距离最短的总体(范金 城等,2002;高惠璇,2005)。

令样本 x_j 为样本 X_j 的 P 个指标组成的向量, 即原始资料阵的第 i 行向量;令样本 x_j 为样本 X_j 的 P 个指标组成的向量,即原始资料阵的第 j 行向量; μ 为总体的均值向量; Σ 为协方差阵。设有 k 个总 体:G₁,G₂,…G_k,均值向量分别用 $\mu_1,\mu_2,…\mu_k$ 表示 为 $\Sigma_1, \Sigma_2, ... \Sigma_k$ 。根据马氏距离的定义,计算新样 本 X 到总体的距离,然后对着 K 个距离进行比较, 根据最短马氏距离判定 X 属于其相应的总体。总 体协方差矩阵相等时,任意取 2 个总体 G_i, G_j ,计算 X 到 G_i, G_j 的马氏距离的平方差为:

其中, $a_i = \sum^{-1} \mu_i$, $b_i = -0.5 \mu_i^T \sum^{-1} \mu_i$ 那么则有 $d^2(X,G_j) \ge d^2(X,G_i) \Leftrightarrow W_i(X) \ge W_j(X)$, $d^2(X,G_j)$ $< d^2(X,G_i) \Leftrightarrow W_i(X) < W_i(X)$ 。

进而得到多总体在总协方差矩阵相等情况下的距离判别准则:若总体 G_a满足:

$$W_{j0}(X) = \max_{1 \le i \le k} W_j(X)$$
 (2)

则 $X \in G_{j0}$ 。

一般情况下,各总体的均值向量 $\mu_1,\mu_2,...\mu_k$ 及公共协方差矩阵 Σ 是未知的,对此可以利用各 总体的训练样本作估计。设 $X_1^{(j)},X_2^{(j)},...X_{nj}^{(j)}$ 是来 自总体 G_i 的训练样本(j=1,2,...,k)记

$$\hat{\mu}_{j} = \frac{1}{n_{j}} \sum_{j=1}^{n_{j}} X_{i}^{(j)} = \overline{X}^{(j)}$$
(3)

$$S_{j} = \frac{1}{n_{j} - 1} \sum_{j=1}^{n_{j}} (X_{i}^{(i)} - \overline{X}^{(j)}) \quad (X_{i}^{(i)} - \overline{X}^{(j)})^{T} \qquad (4)$$

则 $\hat{\mu}_{j}$ 是 μ_{j} 的无偏估计, Σ 是一个无偏估计为 $\hat{\Sigma} \frac{1}{n-k} [(n_{1}-1)S_{1}+(n_{2}-1)S_{2}+\dots+(n_{k}-1)S_{k}] = S$

以 $\overline{X}^{(j)}(\mathbb{IP}\hat{\mu}_{j})$ 和 $S(\mathbb{IP}\hat{\Sigma})$ 分别表示 μ_{j} 和 Σ , 得到相应的 $W_{i}(X)$ 的估计为

$$\hat{W}_{j}(X) = \hat{a}_{j}^{T} X + \hat{b}_{j}$$

式中 $\hat{a}_{j} = S^{-1} \overline{X}^{(j)}; \hat{b}_{j} = -\frac{1}{2} (\hat{X}^{(j)})^{T} S^{-1} \overline{X}^{(j)}$

多总体的距离判别准则为:若总体 G_{j0} 满足式

(6),
$$\emptyset X \in G_{j_0 \circ}$$

 $\hat{W}_{j_0}(X) = \max_{1 \le j \le k} \hat{W}_j(X)$ (6)

3 工程案例

3.1 工程概况

丽江古城某石灰石矿山,地理坐标北纬 26°58′02″~26°58′34″、东经 100°20′32″~100°21′01″,行政 区划属云南省丽江市金山街道,根据采矿许证可开 采标高介于 2 500~2 916 m,高差为416 m。矿区主 要出露的地层为三叠系中统北衙组中段(T₂b²)与 二叠系上统黑泥哨组(P₂h)。根据开采设计方案, 终了边坡在平面上西段长约 420 m,高 416 m,坡面 倾向 120°左右,终了边坡坡角 44°。

3.2 边坡结构面信息

在 305 m 平台上进行结构面测线法获取到 383 组地表岩体结构面信息,通过钻孔定向钻获取到 800 组矿山深部岩体结构面信息。对相关结构面信 息进行统计,结合结构面特征识别为层面(C)和三 组节理面(J₁,J₂,J₃),结构面产状分布信息见表1。

3.3 单轴抗压强度及岩体抗剪强度

采取9件岩芯样进行进行岩石单轴抗压强度 试验,剔除3件异常值后,对其岩石单轴抗压强度 统计结果如表2所示。

利用 JRC-JCS 模型的巴顿强度公式获取的不 连续结构面抗剪强度,根据查理兹(1975年)建立 的回弹值与结构面内摩擦角关系,再根据库伦强 度准则计算结构面抗剪强度。对室内直剪强度参 数和利用 JRC-JCS 模型的巴顿强度不连续结构面 强度参数进行对比(见表 3),本次采用巴顿(Barton)强度准则的结构面抗剪强度。



图 1 矿山终了边坡设计效果图

Fig. 1 Effect picture of final mining slope

表1 岩体结构面分布信息统计表

Table 1 Information statistics of rock discontinuity structural plane distribution

结构面名称	结构面参数	服从分布	统计数	范围值	平均值
目面の	倾向(°)	正态	115	$170 \sim 245$	207.5
広囲し	倾角(°)	正态	115	$17 \sim 51$	35.3
井田 1	倾向(°)	正态	305	$92 \sim 137$	112.8
11年1 ¹	倾角(°)	正态	305	$45 \sim 88$	66. 7
井田 1	倾向(°)	正态	209	$4 \sim 26$	14. 7
D 理 J ₂	倾角(°)	正态	209	$48 \sim 89$	70.9
苹田 1	倾向(°)	正态	209	$95 \sim 175$	154.5
17年13	倾角(°)	正态	209	$9 \sim 65$	40. 4

表 2 岩石单轴抗压强度统计表

(单位:MPa)

Table 2 Statistics of rock uniaxial compressive strength

状态	统计数	范围	平均值	标准差	变异系数	修正系数	建议值	
天然	6	76.1 \sim 109	91.4	11.70	0. 128	0.894	81.7	

表 3 结构面抗剪强度统计表

Table 3 Shearing strength statistics of the structural plane

结构面名称	室内抗 天然	剪测试 状态	巴顿(Barton)强度准则 天然状态		
	黏聚力 C(MPa)	残余摩擦角(°)	黏聚力 C(MPa)	残余摩擦角(°)	
层面 C	0. 175	34.10	0.075	24. 52	
节理 J1	0. 173	33. 63	0. 170	19.59	
节理 J2	0.114	31.77	0. 126	17.67	
节理 J3	0.220	41.33	0.246	14.82	

边坡潜在破坏类型的距离判 4 别法分析

4.1 破坏类型

大型复杂高边坡的破坏产生在特定的边坡岩 体结构上,主滑面依附于早期已经存在的结构面 上(王恭先等,2016),终了边坡主要考虑沿结构 面进行平面或折线形滑面进行破坏,对于破碎根 据《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013 第 5.2.3条条文说明,岩质边坡发育3组以上结构面 且不存在优势外倾结构面通常发生近似圆弧滑动 破坏,根据现场勘察人员经验判断和赤平投影定 性分析边坡可能发生沿 J, 节理的顺层破坏。出 于对矿山实际生产安全考虑,需进一步判断终了 边坡的可能破坏类型。

边坡破坏影响因素及量化指标 4.2

工程地质条件是边坡失稳的主导性因素,岩 小明(2012,2013)、周成豪(2020)根据岩体抗压 强度、结构面产状、结构面和边坡位置关系、岩体 结构类型、岩体或结构面抗剪强度(粘聚力、内摩 擦角)、边坡高度和坡角8个条件进行对边坡破坏 类型进行研究。

由于结构面和边坡位置关系及岩体结构类型 属于定性判别条件,对结构面和边坡位置关系、岩 体结构类型进行量9化表达。结构面与坡面垂直 时取0.9.结构面与坡面斜交时取0.3~0.7(交角 15°~30°时取 0.3, 交角 30°~60°时取 0.5, 交角 60°~75°时取 0.7),结构面与坡面平行时取 0.1, 岩体结构类型为整块状时取 0.9,块状时取 0.7. 层状时取 0.5, 碎裂状时取 0.3, 散体状时取 0.1 (岩小明,2012;岩小明,2013;周成豪,2020)。

马氏距离判别法模型建立 4.3

根据冯夏庭《智能岩石力学》一书中的23个 边坡工程实例为边坡潜在滑动面类型的数据样 本。根据马氏距离判别法的定义,将边坡破坏类 型圆弧型破坏、平面型破坏和折线性破坏定义为 G₁,G₂,G₃,用指标 X₁,X₂,…,X₈ 表示岩体抗压强 度、结构面产状、结构面和边坡位置关系、岩体结 构类型、岩体或结构面粘聚力、岩体或结构面内摩 擦角、边坡高度、边坡坡角。假设 G₁, G₂, G₂ 的协 差阵相等,则使用式(1)~(6)对边坡破坏类型建 立判别函数。

根据工程地质条件,故根据周成豪(2020)按 照马氏距离判别法对边坡潜在破坏类型研究结 果,得到三种破坏类型的判别函数如下。

(1) W₁(X) 对应圆弧型破坏的函数

 $\hat{W}_1(X) = -2.096 + 1.7X_1 + 9.30X_2 + 128.75X_3 432.99X_4 - 33.89X_5 + 56.25X_6 + 0.79X_7 + 33.88X_8$ (7)

(2) W₂(X) 对应平面型破坏的函数

 $\hat{W}_2(X) = -2 \ 188 + 1.8 X_1 + 9.65 X_2 + 140.32 X_3 -$ 490. 34X₄-35. 12X₅+57. 23X₆+0. 81X₇+34. 87X₈ (8)

(3) W₃(X) 对应折线型破坏的函数

 $\hat{W}_3(X)$ 2 112+1.7X₁+9.14X₂+128.27X₃-401.68X₄ $-33.67X_5+57.27X_6+0.77X_7+33.37X_8$ (9)

潜在破坏类型判别 4.4

根据工程地质研究及岩石力学试验结果,本 次按照马氏距离判别法结合周成豪(2020)建立的 破坏类型判别函数,对北西侧边坡破坏类型根据 不同结构面与边坡关系分别进行判别(见表4)。 分析得出边坡沿层面、J、J。节理发生折线滑动破 坏,沿J,节理可能发生平面滑动破坏,但综合判 别边坡可能发生折线滑动破坏。

表4 I段边坡破坏类型判别

Table 4	Discrimination	of slope	failure	type o	f section
T CLUTC I	Distribution	or prope	iunuto	Lype o	1 0000101

Table 4Discrimination of slope failure type of section I										
结构面名称	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	破坏类型	综合破坏类型
层面 C	81.7	35.3	0.9	0.3	0.075	24. 52	416	44	折线	
节理 J1	81.7	66.7	0.1	0.3	0.17	19. 59	416	44	折线	长光温力
节理 J2	81.7	70.9	0.9	0.3	0.126	17.67	416	44	折线	训线用列
节理 J3	81.7	40.4	0.5	0.3	0.246	14.82	416	44	平面	

4.5 潜在破坏类型 Monte Carlo 随机 验证

根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》 GB51016-2014,先对结构面进行统计分析其分布规 律后采用随机模拟的方法模拟结构面网络,目的是 达到概率统计上的一致性,因此采用 Monte Carlo 随 机模拟方法模拟二维结构面网络模拟图,图中不同 颜色的线条代表不同分组结构面,各条节理裂隙在 交叉部位被相互打断,通过迪杰斯特拉(Dijkstra)算 法搜索边坡(I段)潜在最危险滑面边坡全局最优路 径见图 2。根据图 2 可知迪杰斯特拉(Dijkstra)算 法搜索I段边坡破坏类型均为折线破坏,与马氏距 离判别法得到的破坏类型一致。



Fig. 2 Search graph of slope structural plane network simulation and potential failure plane 1—层面 c;2—J₁ 节理;3—J₂ 节理;4—J₃ 节理;5—潜在滑动面;6—现状地形线;7—终了边坡线

5 结论

(1)根据马氏距离判别法结合周成豪(2020) 建立的破坏类型判别函数运用到某露天矿边坡潜 在破坏模式的识别中,其判别结果与采用 Monte Carlo 随机模拟方法模拟二维结构面网络模拟图 利用迪杰斯特拉(Dijkstra)算法搜索边坡破坏类 型一致,说明该方法比较实用。

(2) 对北西段边坡沿 J₃ 节理面判别可能发生 平面滑动破坏与 Monte Carlo 随机模拟方法模拟 二维结构面网络模拟图利用迪杰斯特拉 (Dijkstra)算法搜索边坡破坏类型的主滑面主要 沿 J₃ 节理破坏有较好的相似性。对北西段边坡 沿层面、J₁、J₂ 节理发生折线滑动破坏 Monte Carlo 随机模拟方法模拟二维结构面网络模拟图利用迪 杰斯特拉(Dijkstra)算法搜索边坡整体破坏类型 一致,一方面表明边坡破坏的复杂性,另一方面表 明马氏距离判别法的适用性还需要加强。

(3) 岩小明(2012, 2013) 和周成豪(2020) 仅

对边坡常见的三种破坏类型建立判别函数无法满 足边坡的其他破坏类型分析,也重侧面反映马氏 距离判别法的适用性还需要加强。

致谢:感觉编辑和审稿专家对本文提出详细的修改意见,并对文章修改做出重要的指导。

[参考文献]

- 陈永春,徐翀,陆春辉.2014. 距离判别法在矿山防治水中应用 [J]. 地下水,36(3):70-73.
- 戴兴国,张彪,闫泽正.2018. 有限云模型和距离判别法在边坡稳 定性评价中的应用[J].铁道科学与工程学报,15(1):71 -78.
- 冯夏庭.2000. 智能岩石力学[M]. 北京:科学出版社,199-236.
- 范金城,梅长林.2002.数据分析[M].北京:科学出版社,142-168.
- 高惠璇.2005. 应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社, 175-183.
- 宫凤强,李夕兵.2007. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法 及应用[J]. 岩石力学与工程学报,26(5):1012-1018.
- 罗磊,曹平.2012. 深部巷道岩爆加权距离判别法模型的分析和应 用[J]. 中南大学学报,43(10):3971-3975.
- 彭刚剑,付玉华,董陇军.2009. 基于距离判别法的采空区塌陷预

• 48 •

测研究[J]. 有色金属,61(02):50-54.

- 王晋,李夕兵,杨金林.2011. 深部硬岩岩爆评判的加权马氏距离 判别法[J]. 采矿与安全工程学报,28(3):395-400.
- 王恭先,马惠民,王红兵.2011. 大型复杂滑坡和高边坡变形破坏 防治理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,32-42.
- 王文川,徐冬梅,邱林.2013. 基于距离判别分析法的山洪泥石流 预报模型研究[J]. 水电能源科学,31(4):117-118.
- 岩小明,李夕兵,陈祥云.2012. 基于距离判别分析理论的露天矿 边坡潜在破坏模式识别方法[J].中国安全科学学报,22 (08):124-130.
- 岩小明.2013. 基于可靠度理论的露天矿边坡稳定性风险分析 [D]. 中南大学,12-46.
- 闫长斌.2016. 边坡稳定性预测的粗糙集-距离判别模型及其应

- 用[J]. 工程地质学报,24(2):204-210.
- 闫长斌,路新景.2017. 基于改进的距离判别分析法的南水北调西 线工程 TBM 施工围岩分级[J]. 岩石力学与工程学报,31 (1):1447-1551.
- 朱卓慧,赵伏军,叶洲元.2008. 基于距离判别分析法的冲击地压 预测研究[J]. 中国安全科学学报,18(3):41-45.
- 朱卓慧,冯涛,谢东海.2010. 急倾斜煤层放煤巷道稳定性分类的 距离判别分析法及其应用[J]. 矿业工程研究,25(2):6-9.
- 张彪,戴兴国.2012. 基于有限区间云模型和距离判别赋权的岩体 质量分类模型[J].水文地质工程地质,44(5):150-157.
- 周成豪.2020. 某矿高边坡稳定性及最终边坡角优化方案研究 [D]. 江西理工大学,23-31.

Analysis of Potential Failure Types of Slope by Mahalanobis Distance Discrimination Method

-----A Case Study of a Limestone Mine

WU Zhan-ting

(Guiyang Branch, Northwest Research Institute of Engineering Investigation and Design, Guiyang 550001, Guizhou, China)

[Abstract] The distance discrimination method has been widely used in the field of social science, and some attempts have been made in the field of geotechnical engineering in recent years. Yan Xiaoming, Zhou Chenghao and others applied the Mahalanobis distance discriminant method to study the 23 open-pit slope failure types based on the rock mass compressive strength, slope structural plane inclination, structural plane and slope position relationship, rock mass structural type, rock mass or structural plane shear strength, slope height and slope angle, and found that there was good correlation, and the discriminant function of the three failure types was obtained. This time, the discriminant function established by Zhou Chenghao (2020) is used to test the slope failure type of a limestone mine in Lijiang Ancient Town, and the two-dimensional structural plane network simulation and Dijkstra algorithm are used to search the slope failure type of the slope, but the judgment of J_3 joint structural plane may have plane sliding failure is inconsistent with the broken line sliding failure along the bedding plane, J_1 and J_2 joints, indicating that the complexity of slope failure and the applicability of the Mahalanobis distance judgment method still need to be strengthened.

[Key Words] Markov distance discriminant method; Potential damage type; Open slope; Structural plane