

小浪底库区八里胡同河段岩质高边坡 稳定性随机模拟研究

吕杰堂

王建锋

(中国地质大学,北京) (中国科学院力学所非线性连续介质力学实验室,北京)

摘 要 岩质边坡中潜在滑动面与裂隙网络系统的特征密切相关,正确确定岩质边坡中潜在最危险滑动面,对边坡稳定性评价和边坡合理治理具有实际意义。本文在基于岩质边坡裂隙网络系统的认识基础上,以对斜坡稳定最为不利的两组节理为基础,结合潜在易滑节理迹长,建立了岩质边坡中最危险滑动面的随机生成方法。将地下水、地震、附加荷载等作用作为随机外部因素考虑到边坡稳定分析中。用此方法对黄河小浪底库区八里胡同河段高陡岩质边坡进行了稳定性分析,给出了不同条件下边坡的稳定性。

关键词 岩质边坡 随机搜索 搜索迹长 稳定系数

岩体区别于其它工程材料的最根本特征是其结构性。工程岩体的稳定更多地取决于其结构面网络特征而不是岩块本身的强度;岩质边坡的破坏多是由结构面及其组合控制其滑动面位置和滑动范围的。由于结构面网络的随机分布特征,最危险滑动面位置往往不易预先确定。采用了基于统计与概率理论的 Monte-Carlo 随机模拟技术来确定最危险滑动面位置,并以此为基础进行岩质边坡稳定性评价。

1 岩质边坡最危险滑动面随机模拟方法

岩质边坡在长期地质营力作用下,裂隙系统逐渐发育、贯通,最终形成连续的滑动面而导致边坡破坏,滑动面追踪结构面网络及其交汇部位已成为不可争辩的事实。大量工程实践和试验研究表明,岩体中可能发育有各种产状、规模的结构面组,但对边坡稳定最为不利的是与临空面走向近于平行的二组节理(图 1),图 1 中 A 组节理起到后缘切割作用,而 B 组是滑移面的主要组成,尽管真实滑动面的生成是一个复杂的变形积累和应力释放过程,且中间可能产生“孔压效应”、“滚轴效应”、“摩擦热融效应”等现象,最终的滑动面位置仍多取决于已存在的结构面及其组合,并表现出随机特征:一方面,控制稳定的因素的随机性或随机组合,主要是地下水和地震作用;另一方面是两组节理中,某条节理参与组成滑动面的随机性。

节理岩体在滑移过程中,最危险滑动面呈阶梯状追踪节理系发育,为确定组成最危险滑动面结构面组合,采用 Monte-Carlo 模拟的随机抽样方法,首先对结构面进行统计分析,求得主控结构面组的分布函数和相应数字特征。然后通过对两组结构面随机抽样生成不同长

第一作者:吕杰堂,男,1968年生,在读博士,研究生,水文地质与工程地质专业,邮编:100083

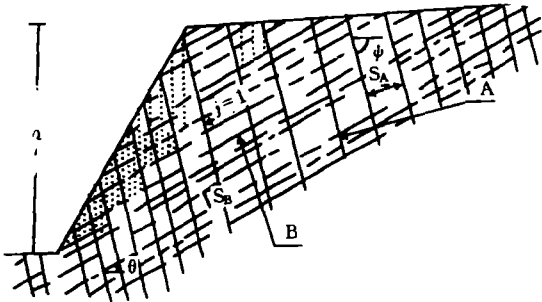


图1 具两组节理的岩质边坡模型

Fig. 1 Rock slope with two group of joints

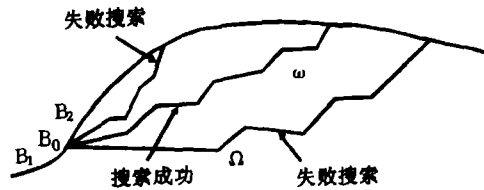
A, B-节理系; 倾角- ψ ; S_A, S_B 间距

图2 岩坡最危险滑动面可能分布域

Fig. 2 Possible area of the most dangerous slip surface in rock slopes

度、不同倾角的滑动段,依次连接这些滑动段,形成一个完整的符合裂隙网络特征和滑移机理的贯通滑动面。

2 搜索迹长及其确定

实际研究表明,图1所示的岩体中对应于同组节理的不同滑动段,其倾角在统计意义下与同组的节理均值相符,而滑动段长度 $l_{j,i}$ 与统计下的实际间距均值 S_A 或 S_B 相差较大。这是由于岩体在滑动之前一般都要经过相当长的变形阶段,在坡体内形成多处塑性区,在某些部位,岩桥被剪破或拉裂,从而使局部滑动段偏离结构面简单组合而追踪原生节理系扩展,此部位滑动段长度因而要大于节理间距 S_A 或 S_B 。在滑动面生成中采用了搜索迹长来考虑这种作用,此长度可理解为边坡应力扰动带弧形卸荷节理延展长度或者说是潜在易滑节理长度,其大小受控于节理岩体边坡的应力场、节理统计特征和力学性质。在滑动面随机生成中,用下述方法确定滑动面搜索迹长(图2):

在预先确定的最危险滑动面分布域 ω 内,若滑动面滑出此区域,则认为此次搜索失败,进行 n 次滑动面生成,记录其搜索失败次数为 m ,失败频率 $P_l = \frac{m}{n}$ 肯定与搜索迹长有关,规定失败频率 P_l 小于某一给定值(如10%)的长度为搜索迹长。

3 最危险滑动面随机生成步骤

下面为岩质边坡最危险滑动面生成过程:

- (1) 确定搜索迹长和相应的分布形式,可用上述试算方法确定。
- (2) 起始点或滑出点选择:在坡脚或可能滑出坡面上可能滑出范围内选择点 $B_0(X_0, Y_0)$,作为起始点。
- (3) 以 B_0 为起点,对两组控制节理倾角和搜索迹长分别用 Monte-Carlo 模拟进行抽样,形成随机节理,并依次交接,按节理组和相应搜索迹长不断延伸(图3)。

倾角随机抽样公式:

$$\theta = \left(\sum_{i=1}^{12} R_i - 6 \right) \delta_0 + \bar{\theta}$$

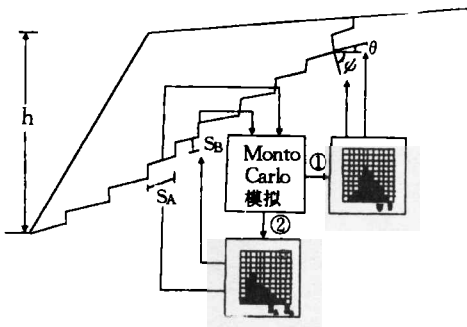


图3 滑动段抽样过程

Fig. 3 Procedure of sampling of slip lines

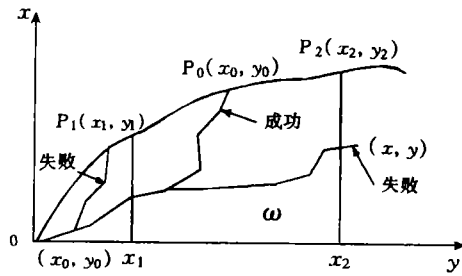


图4 滑动面搜索过程

Fig. 4 Procedure of forming of slip surface

式中: $\bar{\theta}$ ——抽样的节理组中节理倾角平均值; δ_{θ} ——抽样的节理组中节理倾角方差。

搜索迹长抽样公式:

$$l = -\bar{l} \ln R$$

式中: $-\bar{l}$ ——由前面方法确定的节理平均迹长; R —— $[0, 1]$ 上均匀分布随机数。

(4)计算出生成节理组的平均间距 S_A, S_B ,若计算值小于对应节理组的均值,则认为此次搜索不能接受,转到(3)。

(5)若最终点滑出可能域外,则中止此次搜索,转到(3)。

(6)若搜索与坡面相交,则本次搜索结束,求得交点 P_0 ,见图4。

(7)对得到的滑动面进行稳定系数计算,此处用剩余推力法计算。

(8)若达到搜索次数,则转到(9),否则,搜索次数加1,转到(3)。

(9)求得对应于滑出点的最小稳定系数和相应的滑动面。

(10)若已完成可能滑出域搜索,则转(11),否则转(2)继续下一个可有滑出点的搜索。

(11)从所有可能滑出点中找出最小稳定系数者,为边坡最可能或最危险滑动面。针对此滑动面进行分析。

上述过程在输入必要的参数:斜坡地形坐标、地下水位、可能滑出域、强度指标、结构面网格参数(主要两组节理的倾角的分布、均值和方差)、所需的地震强度等后,可由程序自动进行计算。

4 小浪底库区八里胡同段高陡岩质岸坡稳定性随机分析

小浪底库区八里胡同岸段为“V”字型峡谷,由上寒武纪坚硬灰岩组成,岩层产状为 $100^\circ \angle 8^\circ$,岩体总体倾向下游,黄河河谷在此坡处走向为 $NE120^\circ$,岸坡为平叠坡。岸坡平均坡度 50° 左右,局部段近直立,坡高250 m左右。岩体中主要有两组节理(表1),前者中陡,倾向坡外,后者较缓,亦倾向坡外。区内地震烈度为7度。为评价该边坡的稳定性,选择中心断面进行随机模拟,其地下水位取2种状态:天然状态和由正常蓄水位275 m突降到死水位235 m;并分别考虑0度和7度2种地震力作用,

图5为危险滑动面随机搜索搜索结果,表2列出了滑动面搜索计算结果。

表1 斜坡岩体节理概率分布特征

Table 1 The random distribution characteristics of joints in the rock slop

节理组	视倾角			迹长			平均间距/m
	均值	方差	分布类型	均值/m	方差/m	分布类型	
J ₁	50°	4°	正态	5	0.5	负指数	1.5
J ₂	2°	1	正态	3	1	负指数	0.5

表2 最危险滑动面随机搜索结果

Table 2 The searching results of the most dangerous ship surface

水库水位/m	地震烈度	最小安全系数	剩余推力/kN	潜在滑体规模/m ³
160	0	1.52	-245	6296
	Ⅶ	1.43	-474	6853
275→235	0	1.36	-905	6706
	Ⅶ	1.25	-78	7097

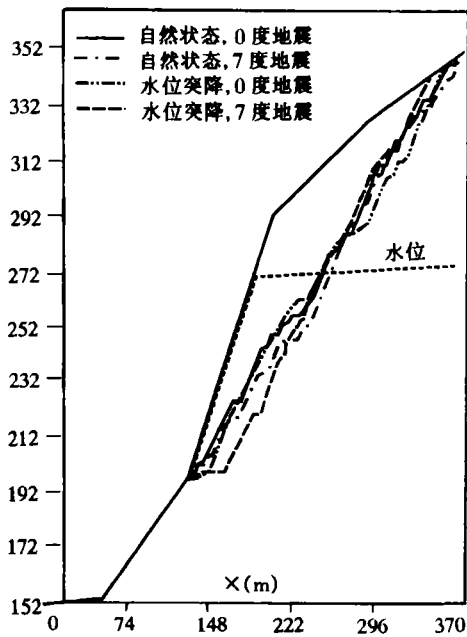


图5 八里胡同各种条件下最危险滑动面
Fig. 5 The Most Dangerous Slip Surface of Balihudong under Several Conditions

从上述计算可以看出:①在各种荷载组合下,该边坡对应的最危险滑动面,稳定系数均大于1,边坡基本稳定,发生大规模滑坡的可能性较小;②各种荷载条件下所得的最危险滑动面无本质差异,反映了岩质边坡稳定性更多地受控于结构特征,而对外部条件变化的反映并不十分敏感;③随地震作用和水位变化,滑体体积变化不大。

5 结论

利用随机搜索技术进行岩质边坡最危险滑动面确定,可充分考虑岩体结构特征,并可顾及各种荷载因素的随机组合,能够较准确地反映出边坡的实际情况。对小浪底库区八里胡同河段岩质边坡的随机模拟计算表明,诱发因素滑动面的位置影响不大,边坡中危险滑动面和边坡安全系数更多地受控于岩体结构特征。计算表明,八里胡同段边坡基本上稳定的。

参 考 文 献

- 1 陶振宇. 节理与断层岩石力学. 武汉:中国地质大学出版社,1992.
- 2 伍法权. 统计岩石力学原理. 武汉:中国地质大学出版社,1993.
- 3 王建锋等. 基于节理岩体结构网络的岩石边坡最危险滑动面随机搜索技术研究. 岩土工程论文集, 武汉:中国地质大学出版社,1996,47~55.

Random Simulating Study of High Rock Slope in Balihudong of Xiaoliangdi Reservoir

Lü Jietang Wang Jianfeng

(China University of Geoscience, Beijing) (LNM, Institute of Mechanics, CAS, Beijing)

Abstract The potential slip surface in rock slope is closely related to the networks of joints system. To correctly find out the slip surface is necessary for the stability analysis and the rational controlling. The paper gives the random search method for the most dangerous slip surface in rock slopes base on the knowledge of joints system and the consideration of searching trace length. The groundwater, earthquake and other external loads are also considered in the method. The method was applied in the stability analysis for the rock slope in Balihudong of Xiaoliangdi Reservoir, the condition of the slope under several kinds of external loads is discussed.

Key words rock slope random search safety factor searching trace length