

两种堤坝稳定分析方法的比较

戴永志

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:利用改良圆弧法和圆弧法分别计算堤坝的安全稳定系数,并将两种方法在材料指标、坝坡、软弱夹层埋置深度和地震力作用等条件下的计算结果进行比较,分析夹层对堤坝稳定的影响.当夹层埋置深度小于坝高,夹层的抗剪强度小于坝堤土抗剪强度的 47% 或在地震区,应采用改良圆弧法计算含软弱夹层堤坝的稳定性.

关键词:堤坝稳定分析;圆弧法;改良圆弧法;软弱夹层

中图分类号:TV312

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)04-0030-04

在软基上设计堤坝时,有的设计者往往只做圆弧滑动稳定计算,不做改良圆弧滑动稳定计算,这样就忽略了软弱夹层对稳定的影响,以致堤坝建成后发生塌滑.美国彭得来顿堤和秦富得坝失事后做了检测,它们的滑动曲线接近图 1 的形状^[1],因此提出地基有软弱夹层的堤坝应当用改良圆弧法做稳定分析.自从改良圆弧法提出以后,有 3 种不同形式的计算滑动面被采用过,其中最常用的形式见图 1.第二种形式只是将图 1 中的圆弧 AB, CD 改成直线;第三种形式也只是将图 1 中的圆弧 AB, CD 改为螺旋曲线.美国垦务局则常用第二种计算形式.考虑到力和滑动面的连续性,本文分析中所采用的形式为第一种.基于圆弧法忽略了软弱夹层对稳定的影响,故本文对改良圆弧法和圆弧法进行深入的比较分析.

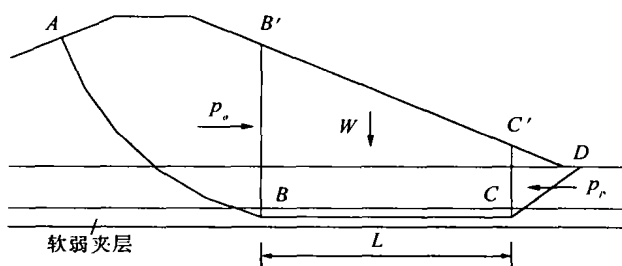


图 1 用改良圆弧法计算滑动面

1 堤坝安全稳定系数的计算方法

1.1 改良圆弧法

改良圆弧法与圆弧法假定的基本区别是:改良圆弧法假定土块的合力是水平作用于相邻的土块上;而圆弧法则假定推动力是与各点滑弧平行的,将

相邻土块的侧推力作为内力考虑.

改良圆弧法的安全稳定系数用下式来表示:

$$F_s = \frac{P_p + S}{P_a} \quad (1)$$

式中: P_p 为土体 DCC' 的抗滑力; P_a 为土体 ABB' 的滑动力; S 为 BC 面上的抗滑力, $S = W \tan \varphi + cL$, 其中 W 为土体 B'BCC' 的有效重量; c, φ 为软弱土层粘聚力和内摩擦角; L 为滑动面经过软弱夹层的水平长度.

求抗滑力 P_p 和滑动力 P_a 时,可将滑动土体 ABB' 及抗滑土体 DCC' 划分为若干土条,用力的多边形方法求 ABB' 内各土条的滑动力及 DCC' 内各土条的抗滑力.将各土条的滑动力总和起来便是滑动力 P_a ,将各土条的抗滑动力总和起来便是抗滑力 P_p .

力的多边形如图 2 所示,其中 W 为土条的有效重量; R 为土条平衡力,其方向与土条底面法线夹角为角,由铅直方向力的平衡得到; F 为土条底边上的孔隙水压力; c 为土条底面长为 L 的弧的粘聚力; α 为土条底边的倾角; H_1, H_2 分别为水位到土条顶、底边的距离; Q 为水平地震荷载; P_{pi} 和 P_{ai} 为平衡土

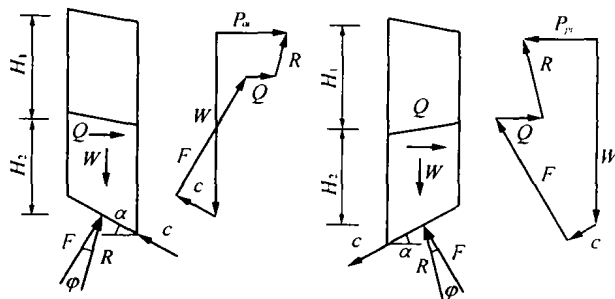


图 2 力的多边形示意图

作者简介:戴永志(1976—),男,江苏徐州人,硕士,主要从事土石坝的应力变形研究.

条所需的水平推力,按力的多边形的作法即可求得 P_{pi} 和 P_{ai} 的计算公式,即式(2)和(3).将 P_{pi} 和 P_{ai} 分别叠加起来可求得 P_p 和 P_a .

$$P_{ai} = (W - F\cos\alpha - c\sin\alpha)\tan(\alpha - \varphi) + F\sin\alpha - c\cos\varphi + Q \tag{2}$$

$$P_{pi} = (W - F\cos\alpha + c\sin\alpha)\tan(\alpha - \varphi) + F\sin\alpha + c\cos\varphi - Q \tag{3}$$

对于式(1),由于 P_p 和 P_a 不能简单地用某一变量的函数来表示,故无法用一阶导数等于零的方法求得最小安全系数.只能设法求得 $P_p + S$ 的最小值或 P_a 的最大值,以试算求得最小的安全系数.本文根据改良圆弧法的计算原理,用 FORTRAN90 编制了程序 RC.FOR^[2],分析 $P_p + S$ 的最小值,再求安全系数 F_s 的最小值.

1.2 圆弧法

本文分析所用的圆弧法为简化毕肖普法^[3],假定各土条之间的切向力均忽略不计,假定土条之间的合力是水平的,由此得安全系数的公式为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{ai}} \left(c_i b_i + \left(W_i \left(1 \pm \frac{1}{3} K_H C_z \right) - u_i b_i \right) \tan \varphi_i \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \left(1 \pm \frac{1}{3} K_H C_z \right) \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^n K_H C_z W_i \frac{e_i}{R}} \tag{4}$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i + \frac{\sin \varphi_i \sin \alpha_i}{F_s \cos \varphi_i} \tag{5}$$

式中: F_s 为土坡的安全稳定系数; W_i 为土条自重; b_i 为土条的宽度; α_i 为土条底边的倾角; c_i 为土的粘聚力; φ_i 为土的内摩擦角; R 为圆弧滑动半径; u_i 为土条底边上的孔隙水压力; e_i 为土条中心至滑动圆心的垂直距离; K_H 为水平地震的加速度系数; C_z 为综合影响系数.

2 土料抗剪强度对安全系数的影响

土的抗剪强度直接影响堤坝的安全稳定系数,不仅软弱夹层的抗剪强度对堤坝安全稳定系数有影响,而且坝堤土和坝基土的抗剪强度同样对堤坝安全稳定系数有影响.为了说明它们的影响程度,利用上述两种稳定方法对图 3 中的土坝进行分析比较,具体各土层的力学指标见表 1.在分析软弱夹层、坝堤土、坝基土各自抗剪强度对安全系数的影响时,只将被分析土层的内摩擦角和粘聚力 c 加以改变,而其他两土层的抗剪强度按表 1 中选取.软弱夹层、坝堤土、坝基土各自抗剪强度对安全系数的影响计算结果分别见表 2、表 3 和表 4.

综合分析上述计算结果可知,土坝的安全稳定系数与软弱夹层的内摩擦角和粘聚力 c 成正比关

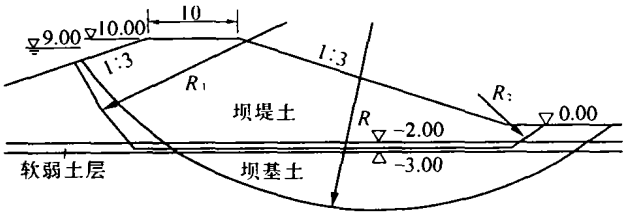


图 3 分析的典型堤坝示意图

表 1 各土层的力学指标

土层名称	天然容重 /(kN·m ⁻³)	饱和容重 /(kN·m ⁻³)	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /kPa
坝堤土	18.0	20.0	25	20.0
地基土	17.0	19.5	20	16.0
软弱土层	19.0	19.5	8.0	12.0

表 2 安全系数随软弱土层的力学指标变化情况

计算 次数	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	安全系数	
			改良圆弧法	圆弧法
1	4.0	5.0	0.976	1.917
2	8.0	10.0	1.740	1.972
3	10.0	12.5	2.118	2.006
4	9.4	11.8	2.005	1.995
5	5.2	6.5	1.215	1.933

表 3 安全系数随坝堤土的力学指标变化情况

计算 次数	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	安全系数	
			改良圆弧法	圆弧法
1	15.0	17.0	1.445	1.658
2	17.5	20.0	1.573	1.885
3	20.0	25.0	1.752	1.980
4	23.0	27.0	1.831	2.060

表 4 安全系数随坝基土的力学指标变化情况

计算 次数	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	安全系数	
			改良圆弧法	圆弧法
1	12.0	14.0	1.752	1.515
2	14.0	17.0	1.752	1.737
3	16.0	20.0	1.752	1.980
4	18.0	22.0	1.752	2.189

系;坝堤土和坝基土的抗剪强度对圆弧法分析结果的影响几乎相同;坝堤土的抗剪强度对改良圆弧法的计算结果影响很大,而坝基土的抗剪强度对改良圆弧法几乎没有影响;土坝安全稳定系数随坝堤土抗剪强度的提高而提高;当软弱夹层的抗剪强度达到坝堤土抗剪强度的 47% 左右时(表 2),可以用圆弧法做稳定计算,而不用改良圆弧法,如果软弱夹层的抗剪强度小于坝堤土抗剪强度的 47%,则应当采用改良圆弧法计算;土坝设计中以安全系数达到 1.2 为标准,当软弱夹层的抗剪强度为坝堤土抗剪强度的 26% 时,改良圆弧法的安全系数为 1.215,而圆弧法的安全系数为 1.933,所以当软弱夹层的抗剪强度小于坝堤土抗剪强度的 26% 时,必须用改良圆弧法进行稳定分析计算.

3 两种方法计算结果的影响因素

3.1 坡度对两种方法计算结果的影响

堤坝的坡度直接影响堤坝的安全稳定系数的大小,但采用不同的计算分析方法其影响程度是不同的.为了分析堤坝的坡度对两种方法分析结果的影响差别,本文对不同的坡度作比较分析.计算分析的例子如图3所示,只是将上下游的坡度加以改变,其余的条件均不改变.各土层的力学参数见表1,具体计算结果见表5.从表5中可以分析出:坝坡直接关系到坝堤的安全稳定,存在一个临界坝坡,在此坝坡下两种分析方法的分析结果相差最大;当坝坡比临界坝坡小或大时,两种方法的计算结果差别都减小.本文计算实例的临界坝坡在1:3.0左右;当坝坡为1:3.5和1:2.5时,两种方法的分析结果已经相当接近,可以用圆弧法计算堤坝的稳定;对本例来说,当坝坡为1:3.0左右时,必须使用改良圆弧法进行分析.

表5 安全系数随堤坝坡度的变化情况

堤坝坡度	安全系数	
	改良圆弧法	圆弧法
1:2.5	1.720	1.732
1:3.0	1.752	1.980
1:3.5	2.106	2.066
1:4.0	2.111	2.112

3.2 埋置深度对两种分析方法的影响

软弱夹层的埋置深度对堤坝的安全稳定起重要作用,对不同的埋置深度两种分析方法的计算结果差别不同.当软弱夹层的埋置深度达到一定值时,可以采用圆弧法计算抗滑稳定.计算实例如图3所示,只是将埋置深度加以改变,其余的条件均不改变,各土层的力学参数见表1,具体计算结果见表6.

表6 安全系数随软弱土层的埋置深度变化情况

软弱土层埋置深度/m	安全系数	
	改良圆弧法	圆弧法
2.0	1.752	1.980
4.0	1.816	2.007
6.0	1.899	1.917
8.0	2.002	1.983

从表6的分析中可知:随软弱夹层埋置深度的增加,两种计算方法的分析结果差别减小,当其埋置深度达到一定的数值时便可以用圆弧法进行稳定分析;圆弧法的计算结果中,稳定系数在6.0m时有所减少.关键是此时圆弧的底边从软弱夹层通过,而随夹层埋深的增加,安全系数增加,此时软弱夹层对圆弧法的计算结果影响减小.经过分析计算可以得出本例各种坝坡条件下可以用圆弧法进行稳定分析的埋置深度(表5),但当夹层的埋置深度小于表7中

的值时应当用改良圆弧法计算.由于本例的坝高为10.0m,结合表7可知,当夹层的埋置深度达到坝高时可以直接用圆弧法进行稳定分析计算,而不用改良圆弧法计算.

表7 用圆弧法进行稳定分析的埋置深度

坝坡	深度/m	坝坡	深度/m
1:2.0	2.1	1:3.5	2.0
1:2.5	3.8	1:4.0	2.0
1:3.0	6.5		

3.3 地震力对两种方法计算结果的影响

我国处于地震的多发区,地震作用将对两种方法的分析结果产生影响,本文对在7度烈度地震的作用下的两种分析方法进行比较.计算实例见图3,为了探明地震力对两种分析方法计算结果的影响,将软弱夹层的力学参数加以改变,具体计算结果见表8(工况1为不考虑地震力;工况2为考虑地震力).

表8 地震力对两种方法计算结果的影响

计算次数	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	工况	安全系数	
				改良圆弧法	圆弧法
1	4.0	5.0	1	0.976	1.917
			2	0.681	1.696
2	8.0	10.0	1	1.740	1.972
			2	1.434	1.760
3	10.0	12.5	1	2.188	2.006
			2	1.801	1.805
4	6.8	8.5	1	1.520	1.954
			2	1.207	1.730

从表8的计算结果可知,当软弱夹层的抗剪强度小时,地震作用下两种方法的计算结果差别很大,但随夹层的抗剪强度的提高,差别是越来越小;夹层的抗剪强度大于坝堤土的50%,便可以用圆弧法计算堤坝抗滑稳定;当软弱夹层的抗剪强度为坝堤土抗剪强度的34%时,改良圆弧法的安全系数达到1.207,而圆弧法的安全系数为1.730,所以当软弱夹层的抗剪强度小于坝堤土抗剪强度34%时必须用改良圆弧法进行稳定分析.

4 大芦湖水库稳定分析结果

大芦湖水库位于山东省淄博市,是一座平原水库.为了提高防洪标准和当地经济发展的需要,在原坝上进行加高.对其中的两个典型断面进行分析,断面9+200加高前坝顶高程为11.30m,上游坝坡为1:12,下游坝坡为1:2.5;加高后坝顶高程16.50m,上游坝坡为1:3.0,下游坝坡不变,加高后的坝轴线在加高前坝轴线左侧12m处.断面2+300加高前坝顶高程11.30m,上游坝坡为1:8.0,下游坝坡为1:2.5;加高后坝顶高程16.50m,上游坝坡为1:3.0,下

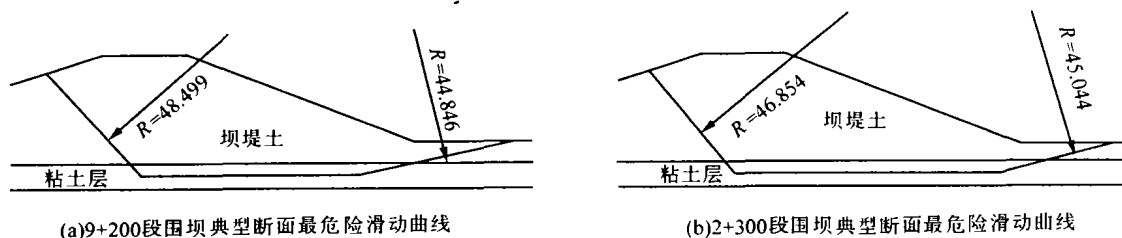


图4 改良圆弧法分析的最危险滑动曲线(单位:m)

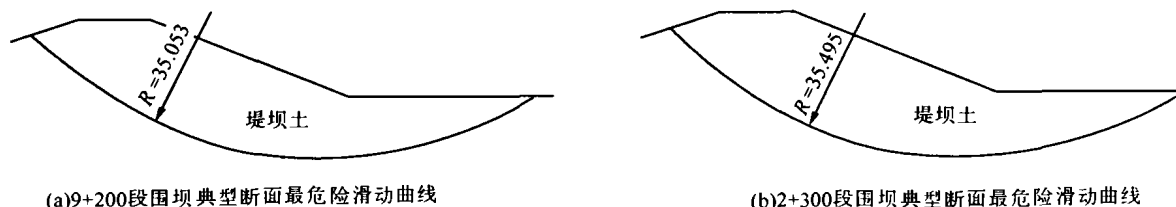


图5 圆弧法分析的最危险滑动曲线(单位:m)

游坝坡不变,加高前后的坝轴线不变。

采用改良圆弧法进行稳定分析,分析结果为:9+200断面的安全系数为1.336,上圆心的坐标为(73.750,106.250),下圆心的坐标为(90.313,95.625);2+300断面的安全系数为1.323,上圆心的坐标为(73.750,106.250),下圆心的坐标为(90.156,95.313)。最危险滑动曲线见图4。

采用圆弧滑动法进行稳定分析,分析结果为:9+200断面的安全系数为1.738,圆心的坐标为(84.375,108.125),半径为35.053m;2+300断面的安全系数为1.676,圆心的坐标为(84.375,108.125),半径为35.495m。最危险滑动曲线见图5。

5 结 语

a. 软弱夹层对堤坝稳定的影响视夹层抗剪强度与坝堤土抗剪强度的比值而定,当软弱夹层的抗剪强度达到坝堤土抗剪强度的47%时,可以用圆弧法计算抗滑稳定。

b. 软弱夹层对堤坝稳定的作用存在一个临界坝坡,在同样埋深条件下,在此坝坡下,圆弧法和改良圆弧法计算的稳定系数相差最大。

c. 当软弱土层的抗剪强度很小时,地震力对改良圆弧法的抗滑稳定影响大于对圆弧法的抗滑稳定

影响,因此在地震区,对软弱夹层的堤坝的抗滑稳定计算应采用改良圆弧法。

d. 随软弱夹层埋置深度的增加,其对稳定的影响程度减小,当夹层的埋置深度大于堤坝的高度时可以用圆弧法作抗滑稳定计算。

e. 从上述实例分析中可知,由于大芦湖堤坝中粘土层的抗剪强度达到坝堤土抗剪强度的47%,故用改良圆弧法计算的安全系数达到安全系数1.2的要求,但由于埋置深度和坝坡度的影响,用圆弧法计算的安全系数比改良圆弧法计算的安全系数大27%左右。

f. 由于软弱夹层对堤坝的安全稳定有重要的影响,当其埋置深度不大,软弱夹层的抗剪强度小于坝堤土抗剪强度的47%时,应当用改良圆弧法计算。

参考文献:

- [1] 顾淦臣,陈明致.土坝设计[M].北京:水利电力出版社,1983.336~339.
- [2] 刘汉东.岩土工程数值计算方法[M].郑州:黄河水利出版社,1995.85~95.
- [3] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].第二版.北京:中国水利水电出版社,1996.

(收稿日期:2001-03-21 编辑:张志琴)

·简讯·

金沙江中游河段水电规划通过审查

金沙江是我国十二大水电基地之一,水力资源丰富,全河分为上、中、下游三段,石鼓以上为上游,石鼓至雅砻江口为中游,雅砻江口至宜宾为下游,全长约2300km,落差约3280m。下游河段水电规划自上而下分为四级开发,即乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝,其中溪洛渡和向家坝已开展可行性研究,可望近期开工建设。中游河段水电规划在2001年4月由国家计委主持通过了审查,决定采用一库八级开发方案,即:上虎跳峡、两家人、黎园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉和观音岩,近期开发工程为上虎跳峡、金安桥和观音岩。上虎跳峡为龙头水库,初拟正常高水位为1950m,可得总库容183亿 m^3 ,其中调节库容138亿 m^3 ,有多年调节性能,装机280万kW,年发电量105亿kW·h。其重要意义在于通过补偿调节,可增加中下游各梯级以及三峡和葛洲坝的保证出力850万kW,对于西电东送有着不可估量的保证作用。

(吴美高供稿)