

边坡临界滑动场方法与应用(Ⅱ)——数值模拟

20
65-68

朱大勇, 姜弘道

(河海大学, 江苏 南京 210098)

TU43

中图分类号: TU43

文献标识码: E

文章编号: 1006-7647(2000)04-0065-04

1 边坡 CSF 的数值模拟(基于力的平衡)

CSF 法数值模拟的关键是如何确定某个设定安全系数下的 DSF. DSF 在理论上是由无数条危险滑动面组成, 边坡体内任一点都有可能位于某条危险滑动面上, 且沿该滑动面上方土体对垂直面上的推力达到最大. 另外, 过任一点向上的危险滑动面只有一条, 对应任一点只存在一个滑动方向与过该点的危险滑动面相切, 这个方向称为危险滑动方向. CSF 法数值模拟的出发点就是试图确定边坡体众多离散点(或称状态点)的危险滑动方向, 这些方向矢量构成边坡危险滑动方向场, 然后在这个场的基础上整理出边坡 DSF.

如图 1 所示, 将边坡体可能滑动范围圈定起来, 将圈定的边坡体划分成若干个固定的垂直条块, 为了便于编程, 条块取同一宽度 b . 沿条块界面(或称条块线)设定离散点, 离散点垂直方向间距为 d . 将边坡分成两大区段即入口段与出口段. 在入口段如果出现负推力可设张裂缝予以消除, 推力置为零; 而在出口段, 为了使滑动面能延伸到边坡表面, 允许负

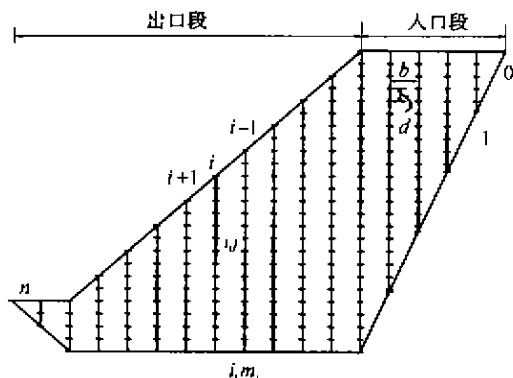


图 1 边坡体分条与离散

推力的存在. 每个离散点均对应有一个危险滑动方向与最大推力.

离散点的危险滑动方向的求解是从入口段到出口段、从上到下按序进行的. 不失一般性, 以第 (i, j) 离散点为例说明如何确定危险滑动方向. 假定该点以前所有离散点的危险滑动方向以及最大推力均已求出. 如图 2, 试取 (i, j) 点的滑动方向与水平面夹角为 α_{ij} , 滑动面与 $i-1$ 条块线相交于 C 点, 设 C 点位于 $i-1$ 条块线上两个离散点 A 和 B 之间. 根据前面假设, 对应于 A 点与 B 点的最大推力 P_A (分量: X_A, Y_A) 与 P_B (分量: X_B, Y_B) 已求出, 那么 C 点的最大推力 P_C (分量: X_C, Y_C) 可由线性插值求出:

$$X_C = \frac{CB}{AB}X_A + \frac{CA}{AB}X_B, \quad Y_C = \frac{CB}{AB}Y_A + \frac{CA}{AB}Y_B \quad (1)$$

根据条间力递推关系, 可求出 α_{ij} 对应的 C 点条间推力 P_{ij} , 不断试取 α_{ij} 使最终 P_{ij} 达到最大. 依次将所有离散点的危险滑动方向求出后, 便生成边坡危险滑动方向场, 如图 3 所示.

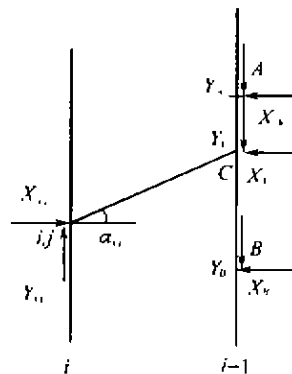


图 2 条间推力的线性插值

由危险滑动方向场可很容易追踪出任一出口的危险滑动面. 如图 3, 从出口点出发, 顺着该点的危险滑动方向向坡体后方追踪交于相邻条块线上, 交点的危险滑动方向可根据相邻两离散点的危险滑动方向的斜率进行线性插值获取. 再沿着插值得到

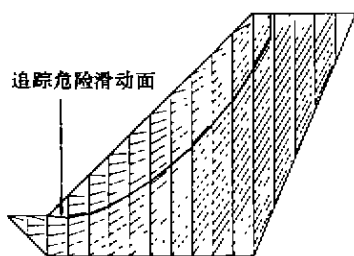


图3 边坡危险滑动方向场

的危险滑动方向继续追踪危险滑动面,直到坡顶张裂缝区为止,便形成一个完整的危险滑动面.以此类推,得到所有出口的危险滑动面,形成最终的危险滑动场 DSF.

在实际计算时,除非特别需要,一般不要求得到某个安全系数下的危险滑动面,最终需要的是含临界滑动面的边坡临界滑动场 CSF 以及边坡最小安全系数.因此需要试取几个安全系数(按一定方式自动迭代生成),按前述步骤模拟出每个安全系数的危险滑动方向场,直到最大的极大剩余推力充分接近零,边坡 CSF 示意图见图 4. 针对每个出口总能模拟出其极大剩余推力的危险滑动方向场,进而获取该出口局部临界滑动面,所有出口的局部临界滑动面构成边坡全局临界滑动场 GCSF,如图 5.

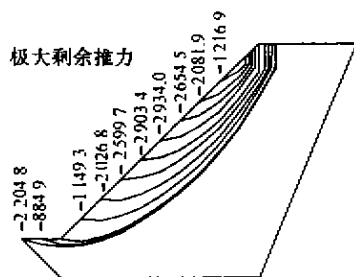


图4 边坡 CSF

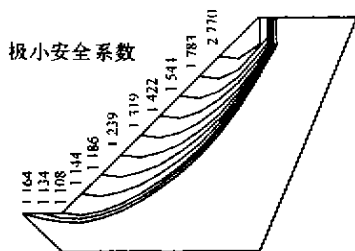


图5 边坡 GCSF

在实际计算时,还可以采用更简明的步骤计算边坡 CSF(GCSF 亦可仿此计算,只不过可采用一些编程技巧减少计算工作量^[1]),其步骤如下:

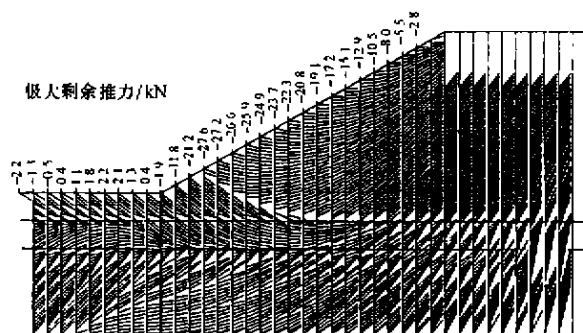
- a. 初设一个安全系数,按上述步骤计算边坡危险滑动方向场,以及边坡所有出口的极大剩余推力.
- b. 以极大剩余推力的最大的出口为出发点追踪出相对最危险的滑动面.

c. 以前面得到的滑动面为基准面,按常规条分法(基于力的平衡)计算安全系数.以此安全系数作为新设值.

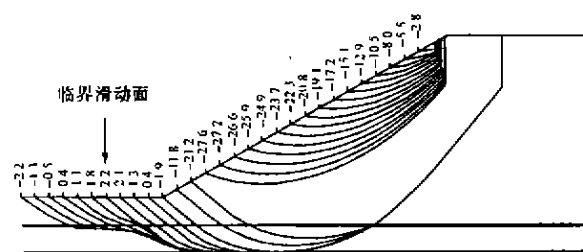
d. 重复 a, b, c, 直到安全系数收敛于某个稳定值,再追踪出最终边坡 CSF.

大量算例表明,上述迭代步骤收敛很快,通常不超过 5 步.

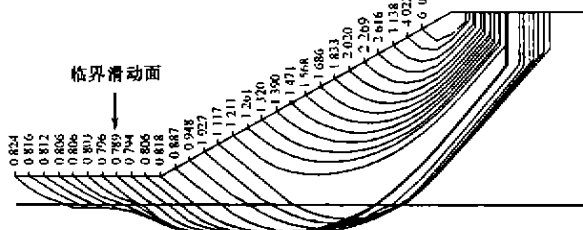
例1 含一层软弱夹层的土坡,软弱层力学参数: $\gamma = 16.66 \text{ kN/m}^3$, $c = 0$, $\varphi = 10^\circ$; 其它土层力学参数: $\gamma = 16.66 \text{ kN/m}^3$, $c = 19.6 \text{ kPa}$, $\varphi = 10^\circ$. 文献[2]应用变分法得到基于简化 Janbu 法安全系数为 0.91. 采用同样的条间力假设,边坡危险滑动方向场、CSF 及 GCSF 见图 6, 边坡最小安全系数为 0.789, 比文献[2]结果小 15%, 说明 CSF 法计算结果更为合理.



(a) 危险滑动方向场



(b) 临界滑动场 CSF



(c) 全局临界滑动场 GCSF

图6 例1 边坡危险滑动方向场、CSF 和 GCSF

2 边坡 CSF 的数值模拟(基于严格条分法)

由于严格条分法能给出最合理的安全系数^[3], 因此在严格法框架下计算边坡 CSF 或 GCSF 更有价

值.作者在文献[4]通过算例论证发现,基于严格法的CSF中临界滑动面或GCSF中的局部临界滑动面在满足力与力矩平衡的同时,仍遵循推力最大原理,因此可以采用基于力平衡CSF的模拟方法计算基于严格法的CSF,严格法CSF及GCSF求解的基本步骤如下:

a. 圈定计算范围,划分条块及离散点.

b. 设定初始值 F_{j0} 和 λ_0 ,可直接取 $F_{j0} = 1, \lambda_0 = 0$,计算所有状态点的危险滑动方向以及坡面出口点的剩余推力,追踪对应最大剩余推力的最危险滑动面或依次预定出口的危险滑动面.

c. 选取上步的滑动面,按严格法计算安全系数 F_{s1} 并得对应条间力函数系数 λ_1 .为了精确起见,计算固定滑动面安全系数时,进一步细分条块.

d. 以 F_{s1} 和 λ_1 为改进值,重复 b 与 c 步,直至前后两次 F_s 差值小于预设范围,如 0.002.对于介质复杂的边坡,预设范围较难选定,根据作者的计算经验,此时可规定迭代最多步数,一般取 5 步就足够了.CSF 的计算在本步就已结束.

e. 选定下一个出口,重复 b 至 d 步计算对应的局部临界滑动面,此时初始值 F_{j0} 和 λ_0 可直接取前一个局部临界滑动面的对应值,这时只需 1~2 步就收敛.如此重复,最终得 GCSF.

例2 边坡参数见图7,本例曾为ACADS(澳大利亚CAD协会)组织的边坡稳定性分析程序考核研究项目的考题^[5].几位国际著名边坡专家(包括我国陈祖煜教授,以色列R. Baker教授以及加拿大D. G. Fredlund教授等)提供了各自的极限平衡法程序的计算结果(见表1).

表1 例2边坡最小安全系数比较

程序名称	程序开发者	临界滑动面求解或搜索方法	安全系数计算方法	最小安全系数	滑面形状
SSA	Baker(以色列)	动态规划	Spencer法	1.39	一般
PC-SLOPE	Fredlund(加拿大)	不详	Spencer法	1.377	一般
STAB	陈祖煜	非线性规划与随机搜索	Spencer法	1.372	一般
EMU	陈祖煜和Donaki	非线性规划与随机搜索	能量法	1.416	一般
SPCSF	本文作者	CSF法	Spencer法	1.359	一般
STAB	陈祖煜	网格法	简化Bishop法	1.387	圆弧
SPDAM	本文作者	网格法	简化Bishop法	1.390	圆弧

CSF法(基于Spencer法)确定的临界滑动面为图7中滑面2,安全系数为1.359,均小于国内外著名学者边坡程序计算的最小安全系数,说明CSF法确已找到了更危险的临界滑动面,充分显示出CSF法的优越性.由图7可见,对于本例,不同方法(包括圆弧法)的临界滑动面位置总体上是比较接近的.

CSF法临界面在上部接近文献[5]优化临界面,而在下部更接近临界滑弧.边坡GCSF见图8,GCSF清晰地显示了边坡总体与局部的稳定性.出口在坡脚附近的几条局部临界滑动面在边坡表层无粘性土中几乎为直线,而在其下土层中滑动面呈弧形;在无粘土与有粘性土交界面上,滑动面方向有明显转折.

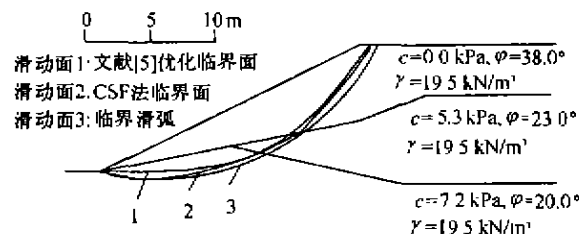


图7 例2边坡参数及有关临界滑动面

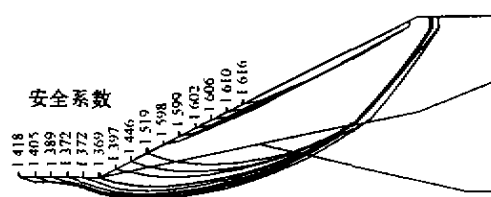


图8 例2边坡GCSF

3 岩体边坡CSF的数值模拟

对于有断层的边坡,断层可视为极薄的软弱层,在层内至少设置一个离散点,这样就能反映断层对边坡稳定性的影响^[6].如果局部岩层有多组密集分布节理时,在计算每个状态点的危险滑动方向与最大推力时,先按无不连续面状况考虑,得出最危险滑动方向 α_0 及其推力 P_0 .然后选定滑动面与每个不连续面重合,分别计算其滑动方向 α_j 与推力 P_j ($j = 1 \sim m, m$ 为不连续面组数),按推力最大原理确定最终的最危险滑动方向 α .

例3 边坡高500m,坡面角45°,层面倾角48°.岩体力学参数: $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3, c = 360 \text{ kPa}, \varphi = 40^\circ$;层面力学参数: $c = 120 \text{ kPa}, \varphi = 36^\circ$.边坡GCSF如图9.

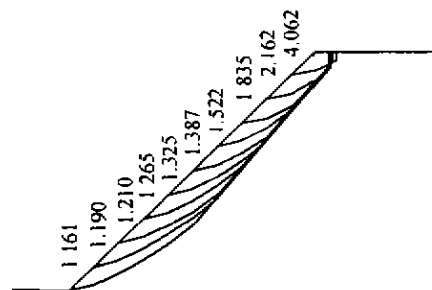


图9 例3边坡GCSF

例4 例3边坡增加两组密集节理,一组顺坡向,倾角15°;一组逆坡向,倾角-30°.节理面抗剪强度: $c = 0, \varphi = 37^\circ$.边坡GCSF如图10.

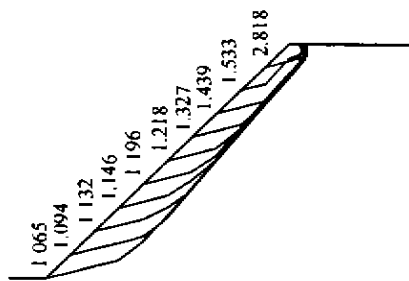


图 10 例 4 边坡 GCSF

4 结 语

以推力最大原理为基础的边坡 CSF 数值模拟过程简单明了,易编制程序,可方便灵活处理许多复杂岩土特性如不均匀性、不连续性、各向异性等;无需设定初始面,计算结果唯一,且能保证得到全局上最优的临界滑动面及最小安全系数。

参考文献:

- [1] 朱大勇,周早生.边坡全局临界滑动场(GCSF)理论及工程应用[J].土木工程学报,1999,32(3):66~72.
- [2] Castillo E,Revilla J.The calculus of variations and the stability of slopes[A].In:Proc 9th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engrg, Vol. 2, Int Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering[C],1977. 25~30.
- [3] Duncan J M.State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J].J of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7):577~596.
- [4] 朱大勇.土体稳定性分析方法——临界滑动场法[D].南京:南京工程兵工程学院,1999.
- [5] Donald I, 陈祖煜.边坡稳定性分析的塑性力学上限解.第一部分:基本原理和方法[Z].水利水电科学研究院,1994.
- [6] 朱大勇,钱七虎,周早生,等.岩体边坡临界滑动场计算方法及其在露天矿边坡设计中的应用[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):567~572.

(收稿日期:1999-11-16 编辑:熊水斌)

(上接第 55 页)

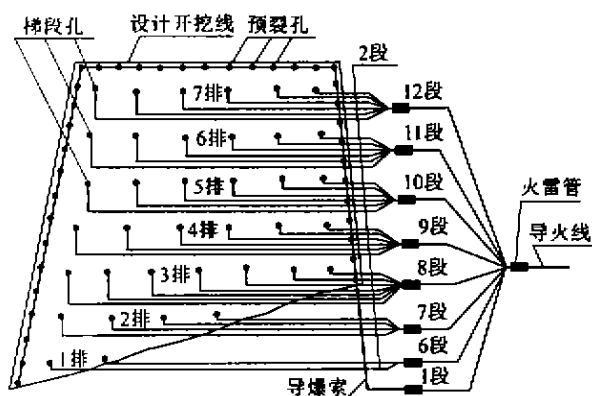


图 2 坝肩基础开挖起爆网络示意图

95%以上的孔留有半孔痕迹。预裂面基岩无损伤、无裂缝、无松动浮石。岩溶风化破碎地段预裂面整体成型规则,原风化裂隙没有被“撕裂”。梯段微差爆破孔爆破彻底,爆碴破碎,堆碴集中,无超爆或硬坎,有利清碴和下一梯段钻孔。

5.2 效益分析

从施工情况看,具有显著的经济效益和社会效益:①不用购置大中型钻孔设备,节省设备费 50%,节省运行管理费用 40%;②与传统方法比较,节省钻孔工作量 45%,节省爆破器材 30%;③严格按设计开挖线开挖,无超欠挖,非建基面开挖边坡仅 1:0.1 左右,减少基础开挖方量 50%,减少坝端混凝土垫层 40%;④左右岸工作面轮流作业,避免工作干扰误工 20%,爆碴破碎,堆积集中,抛投方向准

确,减少清碴工作量 50%,开挖面完好无损伤、无浮石,减少人工撬凿、清理工作量 95%;⑤采用一次性毫秒微差爆破技术,加快了施工进度,提前工期 2 个月;⑥新方法、新材料的应用,无飞石、无危石,有利施工安全和运行管理安全;⑦将多种爆破技术各取所长综合应用,特别适用于拱坝坝肩扭曲面的成型及小转角、小型抽槽和岩溶破碎带的基础保护开挖,促进了先进保护爆破技术在中小型工程中的应用。

参考文献:

- [1] 马乃耀,王中黔,史雅语,阎玉山.爆破施工技术[M].北京:中国铁道出版社,1985.
- [2] 武汉水利电力学院,成都科学技术大学.水利工程施工[M].北京:水利出版社,1980.

(收稿日期:1999-01-11 编辑:张荣安)

