

基于反算原理的滑坡推力简易估算

蒋忠信

(铁道第二勘察设计院岩土工程公司, 四川成都 610031)

【摘要】 滑坡滑面的抗剪强度指标往往用反算法确定。分析表明, 对已变形位移的滑坡, 其推力可不反算滑面抗剪强度指标而直接按现状稳定系数和设计安全系数简易地估算, 一般地, 滑坡推力等于下滑分力乘以设计安全系数相对于现状稳定系数的提高比例值。进而讨论了其对不同设计工况、各种典型形状滑面的适用条件。这是一条估算滑坡推力的捷径。

【关键词】 滑坡推力; 反算原理; 简易估算

【中图分类号】 P 642.22

An Easy Estimation of Landslide Sliding Force Based on Back Calculation Principle

Jiang Zhongxin

(Geotechnical Engineering Co., The 2nd Railways Survey and Design Institute, Chengdu Sichuan 610031 China)

【Abstract】 Shearing strength parameters of slide surface are often determined by "back calculation method". Analysis shows that, for the landslide of situated deformation condition, its sliding force can directly be estimated based on stability coefficient in present and safety coefficient in design. The sliding force equals to the product of distributive downslide force and the relative ratio between the stability and safety coefficients. Further, the suit conditions of the method in every design environments and every typical slide surface shapes are discussed. This is a simple method of estimating landslide slide force.

【Key Words】 landslide sliding force; back calculation principle; easy estimation

0 引言

滑坡推力是抗滑工程设计最主要的依据之一, 计算滑坡推力的主要参数是滑动面的抗剪强度指标。然而, 在实际工作中, 合理确定滑动面抗剪强度指标绝非易事, 一般是综合试验值、经验值、反算值来厘定。室内剪切试验难以模拟现场真实状况, 现场滑面大剪试验则受场地条件和人力物力时间所限而可能失真^[1], 经验值的人为随意性大, 因此往往主要采用反算法来确定滑面抗剪强度指标^[2]。滑坡推力据反算出的抗剪强度指标按设计安全系数正算得出。

其实, 在一定的条件下, 可不反算滑面抗剪强度指标而直接按现状稳定系数和设计安全系数简易估算出滑坡推力。这是一条估算滑坡推力的捷径。

滑面形态考虑平直形、折线形和圆弧形这 3 种典型情况。反算滑面的抗剪强度指标分 3 种方法: 对平直形滑面采用综合内摩擦角 ϕ 法和内聚力 c 、

内摩擦角 φ 法; 对圆弧形滑面采用综合内聚力 C 法。折线形滑面则近似为平直形滑面或圆弧形滑面。

滑坡推力 F 按强度折减法而不按将下滑分力 T 乘以安全系数 K 的荷载增大法。两种方法的结果不同, 荷载增大法虽广为采用, 但该方法所得推力为强度折减法的 K 倍, 不适用于边坡受力状况^[3], 且在反算中显得不合逻辑^[2]。

1 平直滑面滑坡推力估算

1.1 基于反算综合 ϕ 的推力估算

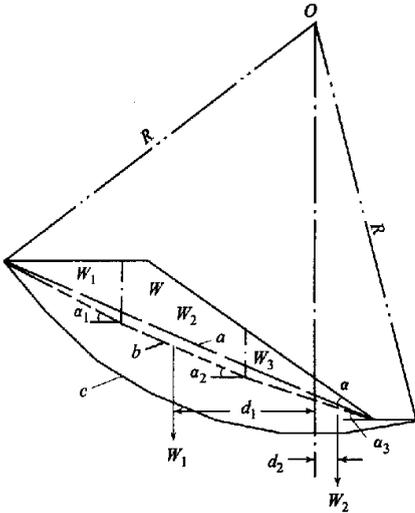
设滑坡体总重为 W , 滑面倾角为 α (见图 1), 长度为 L , 内聚力 c 为 0; 滑坡现状稳定系数为 K_0 。反算综合内摩擦角 ϕ :

$$\text{由 } K_0 = \cos\alpha \tan \phi / \sin \alpha \quad (1)$$

$$\text{得: } \phi = \arctan(K_0 \sin \alpha / \cos \alpha) \quad (2)$$

$$\text{即: } \tan \phi = K_0 \tan \alpha \quad (3)$$

式(3)表明, 当滑坡处于临滑状态 ($K_0 = 1$) 时, 反算出的综合内摩擦角等于滑面倾角。



a—平直形滑面及其参数(W, α);
b—近于平直的折线形滑面及其参数($W_1, W_2, W_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$);
c—圆弧形(近似圆弧的折线形)滑面及其参数(W_1, W_2, d_1, d_2, R)

图1 不同形态滑动面示意剖面

按现状工况下设计要求的安全系数为 K_1 , 按强度折减法, 滑坡推力 F 为:

$$F = W \sin \alpha - W \cos \alpha \tan \phi / K_1 \quad (4)$$

将式(3)代入式(4), 则:

$$F = W \sin \alpha (K_1 - K_0) / K_1 \quad (5)$$

按式(5), 可据下滑分力($W \sin \alpha$)、 K_0 和 K_1 计算出滑坡推力 F 。

1.2 基于反算 c 、 φ 的推力估算

以设定内聚力 c 值, 反算滑面的内摩擦角 φ 为例(设定 φ 值反算 c 的结论与此相同)。由

$$K_0 = (W \cos \alpha \tan \varphi + cL) / (W \sin \alpha) \quad (6)$$

反算得:

$$\varphi = \arctan[(K_0 W \sin \alpha - cL) / (W \cos \alpha)] \quad (7)$$

$$\text{即: } \tan \varphi = (K_0 W \sin \alpha - cL) / (W \cos \alpha) \quad (8)$$

安全系数为 K_1 时的滑坡推力 F 为:

$$F = W \sin \alpha - (W \cos \alpha \tan \varphi + cL) / K_1 \quad (9)$$

将式(8)代入式(9), 则:

$$F = W \sin \alpha (K_1 - K_0) / K_1 \quad (10)$$

结果与式(5)相同。

综合上述2种反算途径, 平直滑面均可按式(5)直接计算出滑坡推力。即: 滑坡推力 F 等于下滑分力($W \sin \alpha$)乘以设计安全系数相对于现状稳定系数的提高比例值($(K_1 - K_0) / K_1$)。

2 圆弧滑面基于反算综合 C 的推力估算

设圆弧滑面下滑段、阻滑段的滑体重分别为

W_1, W_2 , W_1, W_2 重心至滑面圆心铅垂线的力臂分别为 d_1, d_2 , 圆弧长度为 L , 半径为 R (见图1), 则:

$$K_0 = (W_2 d_2 + cLR) / W_1 d_1 \quad (11)$$

设内摩擦角 φ 为0, 反算综合 C :

$$C = (K_0 W_1 d_1 - W_2 d_2) / LR \quad (12)$$

按强度折减法, 滑坡推力 F 为:

$$F = W_1 d_1 / R - W_2 d_2 / R - CL / K_1 \quad (13)$$

将式(12)代入式(13), 则:

$$F = (W_1 d_1 / R)(1 - K_0 / K_1) - (W_2 d_2 / R)(1 - 1 / K_1) \quad (14)$$

按式(14)即可据下滑力($W_1 d_1 / R$)、阻滑力($W_2 d_2 / R$)、 K_0 和 K_1 算出滑坡推力 F 。当 $K_0 = 1.0$ 时, 式(14)简化为:

$$F = (W_1 d_1 / R - W_2 d_2 / R)(K_1 - 1) / K_1 \quad (15)$$

即: 滑坡推力 F 等于下滑分力乘以设计安全系数相对于临界状态的提高比例值($(K_1 - 1) / K_1$)。

3 折线形滑面滑坡推力估算

3.1 近似为平直滑面的推力估算

折线形滑面最为常见。当滑面为近于平直的折线时, 可近似为平直滑面按式(5)估算滑坡推力。此时, 滑面倾角采用加权平均值, 计算推力有一定误差。以等长3折线滑面为例分析如下:

设滑坡3条块等重, 均为 $W/3$; 滑面倾角分别为 $(\alpha + x)$ 、 α 、 $(\alpha - x)$; $K_0 = 1.0$ 。则基于反算综合内摩擦角 ϕ 的途径, 剩余下滑力为:

$$F_3 = (W/3) \{ [\sin(\alpha + x) - \cos(\alpha + x) \tan \alpha / K_1] \phi + \sin \alpha (1 - 1 / K_1) \} \phi + \sin(\alpha - x) - \cos(\alpha - x) \tan \alpha / K_1 \quad (16)$$

式中, 传递系数 ψ 按显式^[4]:

$$\psi = \cos x - \sin x \tan \phi = \cos x - \sin x \tan \alpha$$

而按平均倾角 α 估算的滑坡剩余下滑力 F 为:

$$F = W \sin \alpha (1 - 1 / K_1) \quad (17)$$

将三折线滑面简化为平直滑面所得剩余下滑力 F 的相对误差 $\delta = (F - F_3) / F_3$ 。据式(16)、式(17), 得不同 α 、不同 K_1 时, 相对误差 δ 小于5%时的两折线滑面段倾角的最大差值 x 。(见表1)

可见, 在常见的 α ($10^\circ \sim 40^\circ$)、 K_1 (1.10 ~ 1.30) 的范围内, 两折线段倾角相差 $2.0^\circ \sim 4.9^\circ$ 时, 将3折线滑面平直化所估算的滑坡推力的计算误差小于5%, 可满足抗滑工程设计的精度要求。而且均为正误差, 即计算的推力稍偏大, 设计偏于安全, 是可以接受的。

表1 不同 α 、 K_1 时的 $x^\circ/\delta\%$

$\alpha/^\circ$	K_1				
	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30
10	3.5/4.87	4.0/4.78	4.4/4.96	4.6/4.87	4.9/4.98
15	3.3/4.90	3.7/4.87	4.0/4.95	4.3/4.93	4.5/4.98
20	3.0/4.71	3.4/4.78	3.7/4.91	3.9/4.91	4.1/4.99
25	2.8/4.91	3.1/4.82	3.3/4.79	3.5/4.88	3.6/4.84
30	2.5/4.76	2.8/4.88	3.0/4.88	3.1/4.82	3.2/4.83
35	2.3/4.83	2.5/4.76	2.7/4.95	2.8/4.91	2.9/4.98
40	2.0/4.78	2.2/4.75	2.4/4.97	2.5/5.00	2.5/4.85

3.2 近似为圆弧滑面的推力估算

当滑面为近于圆弧的多折线形时,可近似为圆弧滑面按式(14)估算滑坡推力。对其计算误差举例分析如下:

设滑面由单位长度的6折线段组成,各折线段的倾角分别为 15° 、 10° 、 5° 、 0° 、 -5° 、 -10° ,转角均为 5° ;6条块重分别为0.75、2、2.75、3、2.625、1; $K_0 = 1.0$, $K_1 = 1.25$ 。

据圆弧法, $W_1 = 7.0$, $W_2 = 5.125$; $d_1 = 1.211$, $d_2 = 0.866$; $L = 6.0$, $R = 0.5/\sin 2.5^\circ = 11.463$ 。按式(13)算得设计推力 $F = 0.07046$ 。

据折线法,下滑分力 $T = W \sin \alpha \psi$ 。采用综合 C , $\varphi = 0$,故 $\psi = \cos \alpha$ 。算得 $T = 0.3679$ 。按式(5)估算,设计推力 $F = 0.07358$ 。误差为4.43%,可以接受。

4 估算方法的适用条件讨论

4.1 滑动面形态

对平直形和圆弧形滑动面,分别用式(5)、式(14)估算滑坡推力。

对折线形滑面,转角总和不大于 $4^\circ \sim 10^\circ$,可近似为平直滑面用式(5)估算滑坡推力,且偏于安全。表1显示,滑面的平均倾角愈小,设计所取安全系数愈大,则滑面的允许总转角愈大。

当滑面由上陡下缓的多折线组成,转角总和超过 10° ,可近似为圆弧滑面用式(14)估算滑坡推力。

4.2 现状稳定状态

上述滑坡推力估算是基于反算原理,其关键在于合理确定滑坡的现状稳定系数 K_0 [5]。当滑坡处于变形位移的蠕变阶段至明显位移的滑动阶段时,要根据变形位移趋势评价其稳定程度,在1.10~0.95的范围内合理选用 K_0 值。一般地,蠕变阶段 K_0 取1.10~1.00;滑动阶段 K_0 取1.00~0.95。

4.3 设计工况

在滑坡设计推力的计算中,一般考虑天然工况、

暴雨工况,还可能考虑地震工况和浸水工况。

式(5)、式(14)的设计工况为天然的自然工况。据式(5)、式(14)估算的是天然工况下的滑坡推力。

在暴雨工况下,如果降雨入渗不强烈,滑体仅因含水量增加而导致滑体重由 W 增加为 $W + \Delta W$,则其推力 F' ,对平直形滑面据式(4)、式(3)应为:

$$F' = (W + \Delta W) \sin \alpha - (W + \Delta W) \cos \alpha [K_0 \sin \alpha / (K_1 \cos \alpha)]$$

$$\text{即: } F' = (W + \Delta W) \sin \alpha (K_1 - K_0) / K_1 \quad (18)$$

同理,对圆弧形滑面有:

$$F' = [(W_1 + \Delta W_1) d_1 / R] (1 - K_0 / K_1) - [(W_2 + \Delta W_2) d_2 / R] (1 - 1 / K_1) \quad (19)$$

式(18)与式(5)的形式相同,式(19)与式(14)的形式相同,只是将式(5)、式(14)式中的滑体重 W 改用暴雨工况下的滑体重 $(W + \Delta W)$ 代替。

$$\text{即: } F' = F [(W + \Delta W) / W] \quad (20)$$

式(20)表明暴雨工况下的滑坡推力等于天然状态滑坡推力乘以暴雨工况滑体重与天然状态滑体重之比。

4.4 不能采用本文方法估算滑坡推力的条件

1)尚未开裂变形的潜在不稳定坡体、稳定的古滑坡和已突滑的滑坡堆积体。因其现状稳定系数难以选定,本文方法的误差偏大;

2)暴雨工况下滑面因受水浸润而 c 、 φ 值有所降低;

3)地震工况和浸水工况。因地震力和水压力既减小了抗滑力,又增加了下滑力。

5 结论

1)对已变形位移的岩土质滑坡,在一定条件下,其推力可根据反算原理但又不反算滑面抗剪强度指标,而直接按现状稳定系数和设计安全系数简易估算。这是估算滑坡推力的一条捷径。

2)为满足计算精度,本文方法的适用条件为:

①滑坡处于蠕变阶段至滑动阶段,现状稳定系数 K_0 在1.10~0.95的范围;

②平直形滑面、圆弧形滑面和近似于平直形、圆弧形的折线形滑面;

③现状工况和仅增加滑体重度的暴雨工况。

3)对平直形滑面,采用式(5)估算的滑坡推力,等于下滑分力乘以设计安全系数相对于现状稳定系数的提高比例值。对圆弧形滑面,按式(14)据下滑力、阻滑力、设计安全系数和现状稳定系数估算滑坡推力。对折线形滑面,分别近似为平直形、圆弧形滑面估算滑坡推力。

4)在暴雨入渗仅增加滑体重度的工况下,采用式(18)、式(19)估算滑坡推力,即将式(5)、式(13)中滑体重 W 改用暴雨工况下的 $(W + \Delta W)$ 。

5)基岩顺层滑坡、覆盖层沿基岩面的滑坡,滑面多近于平直,符合采用式(5)的条件。饱和粘性土填筑体滑坡多为圆弧形滑面,符合采用式(14)的条件。开挖坡体引发的工程滑坡,滑面多为折线形,符合近似条件者,可分别采用式(5)、式(14)。本文估算滑坡推力方法的应用范围较广泛。

参 考 文 献

1 蒋忠信. 某山区机场倾斜基底高填方滑坡与防治. 岩土

工程技术, 2003(1): 16~18

2 吴宏祉, 吴宗俭. 关于在滑坡检算中运用反算法的研究. 见: 滑坡分析与防治. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1984. 54~60
 3 郑颖人, 赵尚毅. 滑(边)坡支挡结构设计中的—些问题. 见: 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004. 40~51
 4 张鲁渝, 郑颖人, 时卫民. 边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论. 岩石力学与工程学报, 2005, 18 (6): 177~182
 5 杨宗玠. 反算法中的滑坡稳定系数. 见: 滑坡论文选集. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 286~289

收稿日期:2005-09-01

(上接第 286 页)

$$R = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.65 & 0.35 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.65 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将各层权重值代入评判公式,进行两级综合评判,可得该路基对I,II,III,IV级的隶属度分别为:0.183 367、0.551 075、0.265 516、0,根据最大隶属原则,则该路基处于基本稳定状态。

6 结 论

1)应用多级模糊综合评判方法评价路基的长期稳定性是可行的,由于稳定性受多种因素的影响,正确选择影响路基的长期稳定性的一些主要因素进行分析,则可能得到预测路基长期稳定性的合理判据。

2)路基工程初始资料及长期稳定与否,都存在一定的模糊性。因此,很难用某个精确的关系式来

表达路基长期稳定性的失稳判据。采用模糊数学综合评判方法,对路基长期稳定性用模糊语言进行不同程度的评价,可以得到更为合理的结果。

3)由于路基本身的特点,各层位所要求的力学指标因素的分级标准也不同,为了更好地反映评判结果的可靠性,需进行更多级的评判或做出一些合理的处理。

参 考 文 献

1 邓学钧. 路基路面工程. 北京:人民交通出版社,2002. 27~218
 2 赵焕臣,许树柏,和金生. 层次分析法. 北京:科学出版社,1986. 12~50
 3 靳泽先,等. 模糊数学方法在边坡稳定性评价中的应用. 水文地质工程地质,1987(6):10~13
 4 楼世博. 模糊数学. 北京:科学出版社,1983. 32--62
 5 黄克中,毛善培. 随机方法与模糊数学应用. 上海:同济大学出版社,1987. 293~325

收稿日期:2005-07-21