

文章编号: 0451—0712(2005)12—0073—04

中图分类号: U416. 14

文献标识码: B

圆弧滑动边坡强度参数瑞典法反分析

邱利锐¹, 李维朝², 文 斌³

(1. 广东粤赣高速公路有限公司 河源市 517000; 2. 华北水利水电学院 郑州市 450008;
3. 河海大学岩土所 南京市 210098)

摘 要: 基于运用工程边坡的实测资料反算强度参数的目的,改变了瑞典法安全系数的表达公式,使其适用于较均质的土质或类土质边坡的参数反算。通过反算粤赣高速公路一个不稳定边坡的实测资料,得到了不稳定体的强度参数,通过分析反算过程的误差传递规律,给出了计算结果的误差范围。计算结果表明,反算需要的条件不高,得到的强度参数符合工程实际,对于校核勘察结果和试验数据,修订边坡设计具有实际意义。

关键词: 边坡设计; 瑞典法; 反算法; 强度参数; 边坡

岩土体强度参数是边坡工程稳定性分析中必不可少数据^[1]。在进行边坡开挖设计时,岩土体的强度参数大多来源于以下4个方面^[2]:现场试验、室内试验资料、专家及相关资料推荐值和类似地质条件下所采用的指标及设计单位经验值。但此4种方法各有其缺点:现场试验经费多,试验周期长,取值难;室内试验的取样存在随机性,且取样时易造成岩土体的扰动,直接影响试验数据的代表性;推荐值和经验值虽然易得,但其取值主观性较强,可能会因人而异。相对于以上4种方法而言,利用反算法来获得边坡的强度参数,可靠、经济、简单易行。

本文算法的基本思路是通过边坡破坏前的几何形态,在分析确定坡体破坏机制及滑动情况的基础上,修改瑞典法的表达公式,得出极限平衡状态时的边坡几何形态参数与岩土体抗剪强度指标的关系,从而利用平衡方程得出边坡的强度参数。

1 瑞典法反分析

1.1 边坡强度反算方法简介

当前关于边坡强度的反算方法主要有两类。一

类是位移反算法,它是从滑坡体运动的动力学原理入手,结合滑体起动、滑动及制动的机理,推导出滑体变形时边坡上任意点的位移与时间的关系式,此关系式揭示了边坡上任意点位移与边坡几何、物理参数间关系的内在规律,并以此规律为基础,进行滑体位移反算^[3]。

另一类是安全系数反算法,它具体有2种方法^[4]:(1)对于易于恢复滑动前滑坡主断面的边坡,将滑坡要滑动而未滑动的瞬间视为极限平衡状态,即稳定系数 $F_s=1$,列出极限平衡方程来求解强度参数;(2)对于不易恢复原地面线的边坡,根据滑坡所处的发育阶段及其相应的稳定系数 F_s (如表1所示),用现有断面进行反算。

表1 不同滑动阶段的安全系数取值

滑动阶段	安全系数取值
蠕动阶段	1.05~1.10
挤压阶段	1.01~1.05
等速滑动	1.00
加速滑动	0.95~0.98

收稿日期: 2005—08—12

induce geological disasters, so great attension to the safe control of high slope engineering should be paid. On the basis of a representative monitored example of high slopes on Yue-Gan Expressway, the actualized method of monitoring, the course of data processing and the guidance of the engineering are introduced. Through the monitoring data the reliability of the mornitoring method is showed.

Key words: expressway; high slope; monitor; result analysis

本文采用的是第二类安全系数反算法。

1.2 瑞典法简介^[5]

瑞典法是条分法中最古老而又最简单的方法。它有 4 个假定：(1)滑裂面为圆柱面；(2)不考虑土条两侧的作用力；(3)定义安全系数为每一土条在滑裂面上所能提供的抗滑力距之和与外荷载及滑动土体在滑裂面上所产生的滑动力距和之比；(4)边坡滑面服从 Mohr-Coulomb 强度理论。

基于以上假定，得出考虑有效抗剪强度的瑞典法安全系数计算公式为：

$$F_s = \frac{\sum (c'_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \phi'_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中： c'_i 、 ϕ'_i 分别为有效抗剪强度指标； l_i 为土条底部长度； α_i 为土条底部坡角； W_i 为土条本身自重； u_i 为土条底部孔隙水应力。

1.3 反算方法

为了得到简单、有效的强度参数反算方法，依据安全系数反算法，本文在瑞典法的基础上做了进一步假设：滑动面上各条块顺滑动方向上的抗剪强度参数相同，即 $c'_i = c'$ 、 $\phi'_i = \phi'$ 。

依据本次假设，式(1)变为：

$$F_s = \frac{c' \sum l_i + \tan \phi' \sum (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

改变式(2)得到：

$$F_s = mc' + n \tan \phi' \quad (3)$$

式中：

$$m = \frac{\sum l_i}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

$$n = \frac{\sum (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

由式(3)中 m 和 n 的表达式可以看出， m 和 n 的计算结果取决于边坡体的自重和水位线及滑动面的位置。在边坡反演中，边坡滑动体的自重及水位线和滑动面的位置都是已知的，因此 m 和 n 为一常数，则式(3)可用方程 $F_s = f(c', \phi')$ 表示，其中安全系数为已知值，具体取值可视边坡情况参考前文所述。该方程是关于有效抗剪强度参数 c' 和 ϕ' 值的一个二元一次方程。对于同种类型的岩土体，当滑坡体的数量为 1 个时，此方程为一不定方程，可以通过工程类比等方法确定一个待定参数再求得另一个参数；当滑坡体的数量是 2 个时，此方程组就存在唯一解；当滑坡体的数量超过 2 个时，上式是一个超静定方程，可

以通过最小二乘法等方法求得一个最优解^[6]。

1.4 反算结果修正

文献[5]指出，由于瑞典法在计算安全系数时没有考虑条间力的作用，这会使每一条块力的平衡条件和条块本身的力矩平衡条件不满足，仅能满足整个滑动土体的整体力矩平衡条件，由此产生的误差，一般使求出的安全系数偏低 10%~20%，并且这种误差会随着滑裂面圆心角和孔隙压力的增大而增大。

考虑误差后，反算式(3)变为：

$$F_s(1-d\%) = mc'' + n \tan \phi'' \quad (4)$$

为了便于考虑误差前后结果的对比，转化式(4)得到：

$$F_s = mc' + n \tan \phi' \quad (5)$$

式中：

$$c' = c'' \frac{1}{(1-d\%)} \quad (6)$$

$$\tan \phi' = \tan \phi'' \frac{1}{(1-d\%)} \quad (7)$$

d 为瑞典法所求安全系数偏低的百分数； c'' 、 ϕ'' 为考虑误差时反算出的强度参数； m 、 n 同上； c' 、 ϕ' 为同上，不考虑误差时反算出的强度参数。

由式(3)至式(7)可以看出，抗剪强度参数的反算结果跟瑞典法计算安全系数的误差有很大的关系，瑞典法计算安全系数的误差会在反算时传递给强度参数，造成强度参数的误差。利用瑞典法正算出的安全系数偏低，但此部分偏低误差可以作为边坡稳定性的储备。而反算时，安全系数的偏低会造成反算出的强度参数的偏高，依据前文可以看出，一般瑞典法反算出的强度参数 c' 和 $\tan \phi'$ 偏高 11%~25%，这时的结果如果直接用于边坡设计会造成失稳隐患，应当利用式(6)和式(7)进行误差处理，利用得出的 c'' 和 ϕ'' 用于边坡稳定计算。

2 实例分析

2.1 工程概况

粤赣高速公路 HK41+550~HK41+650 段为粤赣高速公路与建设中的河龙高速公路连接线的组成部分，和热水互通 A 匝道相连。该段南侧为一五级高边坡^[7]，边坡相对高度约 50 m，场地上覆的第四系坡残积地层已被开挖，其厚度约 5~10 m。其下伏为侏罗系变质砂岩，按风化程度分为强风化层和弱风化层。强风化变质砂岩为紫红色和褐黄色，原岩结构清晰，裂隙极发育，裂隙面被铁锰质浸染，多呈土夹碎石状或碎石夹土状，部分呈坚硬土状，碎石风化程

度(软硬)不均,部分呈弱风化状,厚度约 12.1~20.1 m。弱风化变质砂岩为青灰色,块状构造,裂隙发育,岩芯多呈柱状,蚀变现象明显,具硅化,岩质较坚硬,钻探显示该层顶面标高 33.18 m,揭露厚度 3.40 m。

2.2 塌滑简介

2005 年 4 月 24 日~5 月 5 日该地区持续降雨达 183 mm,超过年平均降雨量的 9%。雨后,5 月 6 日巡视检查发现该坡在开挖及一、二级坡支护完毕后的情况下,堑顶出现了拉裂缝,滑坡体前缘在一级坡坡面出露。针对此情况,于 5 月中旬对该坡第三~五级边坡进行了卸荷处理。5 月末发现卸荷后的三~五级坡出现下座,形成贯通裂缝,显露出滑坡体的前后缘(如图 1 所示),就再次对该坡进行了卸荷处理。该地区 6 月 12 日~6 月 20 日累积降雨量超过 400 mm,其中 6 月 20 日超过 200 mm。6 月 20 日下午雨中巡视发现第 2 次卸荷后的四级坡及其平台发生了滑动(如图 2 所示)。

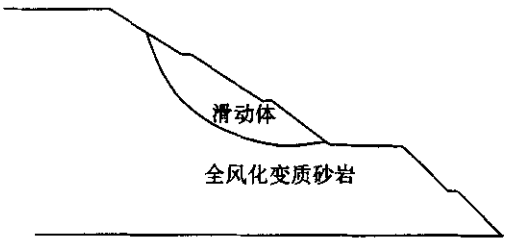


图 1 第一次卸荷后滑坡体

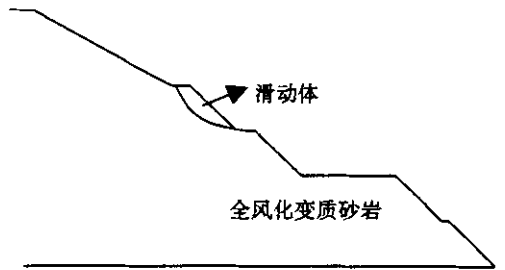


图 2 第二次卸荷后滑坡体

该坡 2 次卸荷后的滑动均产生于强降雨后,经勘察发现,滑坡体位于坡体开挖后的强风化变质砂岩岩体内,滑动面近似为圆弧形,滑坡岩体及其滑动面均处于饱和状态。

2.3 反算强度参数

粤赣高速公路 HK41+550~HK41+650 南侧高边坡 2 次卸荷滑动均随雨后,经勘察发现,滑动面及其上部土体已全部呈饱和状态。则滑动时,滑动面上的孔隙水压力为:

$$u_i = \gamma_w h_i \tag{8}$$

式中: u_i 为条块底部孔隙水应力; γ_w 为水的容重; h_i 为条块高度。

鉴于此种人工设计的路堑边坡很容易恢复滑动前的滑坡主断面,就采用上文所述的安全系数反算法中的第一种,将滑坡要滑动而未滑动的瞬间视为极限平衡状态,即稳定系数 $F_s = 1$,则式(2)可改写为:

$$1 = \frac{c' \sum \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + \tan \phi' \sum b_i h_i (\gamma_{sat} - \frac{\gamma_w}{\cos^2 \alpha_i}) \cos \alpha_i}{\sum \gamma_{sat} b_i h_i \sin \alpha_i} \tag{9}$$

同样改变表达方式得到:

$$1 = m c' + n \tan \phi' \tag{10}$$

式中:

$$m = \frac{\sum \frac{b_i}{\cos \alpha_i}}{\sum \gamma_{sat} b_i h_i \sin \alpha_i}$$
$$n = \frac{\sum b_i h_i (\gamma_{sat} - \frac{\gamma_w}{\cos^2 \alpha_i}) \cos \alpha_i}{\sum \gamma_{sat} b_i h_i \sin \alpha_i}$$

$b_i = l_i \cos \alpha_i$, 土条宽度;

γ_{sat} 为岩体的饱和容重。

文献[8]指出,经室内试验结果统计分析表明,岩体重度的变异性较小。故在本次反算时,采用室内试验得出的试样在饱和状态下的容重为 20 kN/cm³,并不考虑岩体重度的变异性。

通过恢复边坡 2 次卸荷滑动前的原始状态(图 1、图 2),得到 $m_1 = 0.0186, n_1 = 1.9812; m_2 = 0.0371, n_2 = 1.4051$ 。将这些数据代入式(10)后可得图 3。该图中两直线的交点为 $c' = 12.2$ kPa, $\tan \phi' = 0.39$ 。

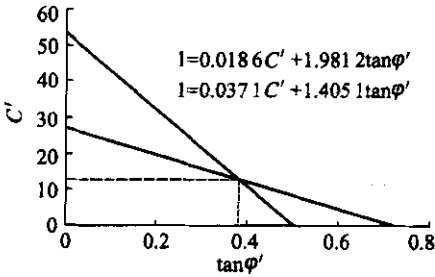


图 3 直线法确定岩体强度参数值

利用前文所述的结果修正,选用最大偏高值 25%,利用式(6)和式(7)修正误差得出 $c'' = 10$ kPa, $\phi' = 17^\circ$ 。取最大偏高值得出的强度参数略有保守,

可以用于边坡设计。

3 结语

(1) 本文对当前边坡强度反算方法进行了简要介绍。

(2) 基于当前边坡强度安全系数反算方法的思路, 改变了瑞典法的表达公式, 使其易于反算圆弧滑动坡体的强度参数。

(3) 分析得出瑞典法反分析得到的强度参数结果偏高 11%~25%, 存在隐患, 不能直接使用, 应用公式 $c'(1-d\%) = c''$; $\tan\phi'(1-d\%) = \tan\phi''$ 进行修正。

(4) 利用改变后的瑞典法表达公式, 针对粤赣高速公路 HK41+550~HK41+650 南侧高边坡的实际卸荷后的塌滑情况进行了反算, 反算的结果经修正后得出强度参数 $c''=10$ kPa, $\phi''=17^\circ$, 符合工程实际, 为该坡的设计变更提供了帮助。

参考文献:

- [1] 杨志法, 等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [2] 铁道科学研究院. 路堑边坡陡坡路堤地质调查评估报告[R]. 2003.
- [3] 李林, 李锁平. 圆弧形滑坡反分析技术研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(4).
- [4] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4).
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [6] 喻军华. 岩质高边坡开挖与支护过程分析[D]. 浙江大学工学博士学位论文, 2003.
- [7] 广东省地质建设工程勘察院. 粤赣高速公路 19 标 HK41+550~HK41+650 南侧边坡工程地质施工勘察报告[R]. 2005.
- [8] 莫海鸿, 朱玉平. 观光塔边坡的稳定性分析与治理措施[J]. 岩土力学, 2004, (增).

Back Analysis of Strength Parameters of Circular Sliding Slopes Based on Swedish Circular Method

QIU Li-rui¹, LI Wei-chao², WEN Bin³

(1. Guangdong Provincial Yue-Gan Expressway Co. Ltd., Heyuan 51700, China;

2. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China;

3. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to back analyze the strength parameters and through measured materials of engineering slopes, the expression formula of Swedish method is changed to make it to suitably back analyze the parameters of relative homogenous or analogous soil slopes. The strength parameters of an unstable body are got by back analyzing measure material of one slope of Yue-Gan Expressway, and the error range of computational results is given by analyzing the error-transfer rule on the process of back analysis. Computational results show that back analysis needs low condition and has practical meaning for checking the survey results, testing data, and correcting the slope design.

Key word: design of slope; Swedish circular method; back analysis; strength parameters; slope