

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.037

基于强度折减法的分步施工边坡稳定性分析

陈雪珍^{1,2}, 简文彬^{1,2}

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 岩土工程与工程地质研究所, 福建 福州 350108)

摘 要: 工程上常采用极限平衡法分析边坡的安全稳定性,但由于极限平衡法的局限性,使得计算结果只能反映边坡安全系数的大小,不能确定边坡在施工各个阶段的变形稳定情况,因此以永宁高速公路边坡为研究对象,通过 PLAXIS 有限元强度折减法对边坡施工过程中可能产生的变形、位移进行模拟分析,得到分步施工状况下,施工各阶段边坡的变形图以及整体的安全系数,并将结果与极限平衡法计算结果进行对比分析。结果表明:边坡的安全系数随着坡体的逐级开挖会不断降低,需及时进行支护加固,强度折减法所确定的边坡最终滑动面形状与极限平衡法计算结果较为一致,且安全系数差值仅为 3%,从而也验证了强度折减法对于分步施工边坡安全稳定性分析的适用性与正确性。

关键词: PLAXIS 软件;分步施工边坡;强度折减法;安全系数;极限平衡法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)01—0207—04

Stability Analysis of Staged Construction Slope Based on Strength Reduction Method

CHEN Xuezheng^{1,2}, JIAN Wenbin^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Institute of Geotechnics and Engineering Geology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: The stability of slope is usually analyzed by limit equilibrium method in project, however due to the limitation of the limit equilibrium method, the calculation results can only reflect the size of the slope safety factor, and can't determine the deformation stability of the slope at all stages of the construction. In this paper, by taking the slope of Yong Ning Expressway as the study object, the deformation and displacement of the slope during the construction are simulated and analyzed by finite element strength reduction method of PLAXIS, and finally get the deformation figure and entire safety factor of the slope at each stage of construction, and the results are compared with the results of the limit equilibrium method. The results show that the safety factor of the slope will be reduced with the step-by-step excavation of the slope, so it need timely support reinforcement. The final sliding surface shape determined by the strength reduction method is consistent with the limit equilibrium method and the safety factor difference is only 3%, therefore the applicability and correctness of the strength reduction method for the safety stability analysis of the staged construction slope are also verified.

Keywords: PLAXIS software; staged construction slope; strength reduction method; safety factor; limit equilibrium method

在多山地区进行高速公路、一二级公路等土木工程建设时不可避免地需要进行岩土体的开挖,形

成大量的边坡,由此便涌现出了大量的公路边坡稳定性问题。对于边坡的稳定性分析,目前主要有两

类:一类是以刚体平衡理论为基础的极限平衡法^[1-3];另一类是以连续介质力学为基础的有限元数值分析法^[4-8]。

极限平衡法因其原理简单、理论成熟,并能得到物理意义明确的边坡稳定安全系数与破坏面,成为当下最广泛使用的边坡稳定性分析方法;但其不考虑岩土体自身的应力-应变关系^[9],且需要假定一系列的条件,计算结果只能反映边坡安全系数的大小,不能确定破坏机理。而有限元法能够提供不同的本构模型,反映土体的应力-应变关系,还原土体变形的发展过程,得到边坡变形和应力分布的情况,并以云图的方式呈现,结果直观明了。

因此,本文利用 PLAXIS 软件中的强度折减法对分步施工边坡进行稳定性分析,并将结果与极限平衡法作对比。

1 PLAXIS 强度折减法简介

利用有限元软件 PLAXIS 可以解决平面应变问题和轴对称问题^[10],它能够模拟土体、板、土工格栅、锚杆、隧道、物体与土体接触面、隧道等,模拟分析得到土体变形、固结、稳定性分析、渗流计算等结果。在该软件中,通过强度折减法来求解边坡的安全系数,计算前不需要假定边坡滑动面的形状与位置。强度折减法就是对模型的强度参数 $\tan\varphi$ 和黏聚力 c 进行不断地折减,通过逐级加载的弹塑性有限元数值计算来确定计算模型的应力场、应变场和位移场^[11-12],并对应力、位移的分布特征以及有限元计算过程中的部分数学特征进行分析,根据一定的失稳判据^[13-15]确定边坡达到极限平衡状态,停止计算,此时得到的强度折减系数 $\sum M_{sf}$ 便是边坡整体的安全系数。强度折减系数 $\sum M_{sf}$ 表达式为

$$\sum M_{sf} = \frac{\tan\varphi_{\text{input}}}{\tan\varphi_{\text{reduced}}} = \frac{c_{\text{input}}}{c_{\text{reduced}}}$$

其中, $\tan\varphi_{\text{input}}$ 与 c_{input} 为程序在定义材料属性时输入的强度参数值; $\tan\varphi_{\text{reduced}}$ 与 c_{reduced} 为程序计算过程中折减后的强度参数值。程序开始计算时,默认初始 $\sum M_{sf} = 1.0$,该值随着计算不断增大直至模型破坏后趋于一定值,此时便得到了边坡的安全系数值。

2 边坡工程概况

拟建边坡为永安至宁化高速线路上的挖方边

坡,路面设计标高约 484 m。场区地处福建省三明市明溪县罗家墩,属低山丘陵地貌,原始的山坡自然坡度为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 左右,对山体进行挖方后,会在路线右侧形成一个高约 31.5 m 的边坡。钻孔揭露的岩土层至上而下分别为坡积粉质黏土,残积砂质黏性土,全风化花岗岩和砂土状强风化花岗岩。

拟建边坡为永久性高速公路边坡,安全等级为一级。拟对该边坡从坡脚至坡顶按四级放坡,分段开挖并支护。第一、二、三级坡均按 1:1.25 放坡,坡高均为 8.0 m,第四级坡按 1:1.50 放坡,坡高 8.5 m,边坡总设计高度 32.5 m,每级设 2 m 宽平台。对二级、三级坡进行预应力锚索框架网格梁支护,对一级、四级坡进行液压喷射植草灌护坡。

由极限平衡法计算得到支护后的边坡安全系数为 1.272,满足规范要求^[16]。但是该计算结果不能反应边坡在施工各个阶段的变形稳定情况,未能确保边坡在各个阶段的安全性,因此运用有限元软件 PLAXIS 对该分步施工的边坡进行模拟分析,同时论证支护方案的可行性。

3 强度折减法的计算与分析

3.1 有限元模型的建立与计算

根据边坡形态进行几何模型的输入和模型网格的生成,其中有限元网格划分采用 15 单元节点,几何模型的尺寸为 1:1,并且用标准固定边界单元来模拟边界条件。边坡模型中用点对点锚杆模拟锚杆自由段;用土工格栅模拟锚杆注浆段,因为它具有轴向刚度而无弯曲刚度的细长型结构,能承受拉力而不能承受压力^[17];坡面框架梁结构采用板结构模拟。对各单元进行赋值,并定义边坡初始地下水条件,完成后生成网格图,见图 1。岩土体与各支护结构的计算参数如表 1、表 2 所示。

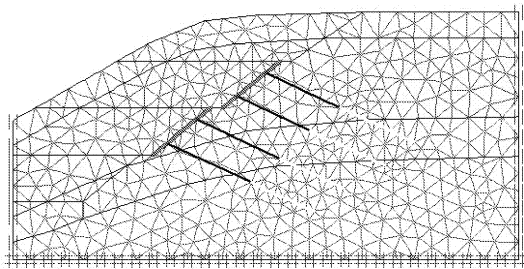


图 1 边坡模型网格图

表 1 岩土层材料参数表

岩土层名称	材料模型	材料类型	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	γ_{sat} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	E_{ref} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	ν	C_{ref} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	φ /($^{\circ}$)
坡积黏性土	摩尔-库仑	不排水	17.5	18.6	1.0×10^4	0.32	18.0	18.0
残积砂质黏性土	摩尔-库仑	不排水	18.0	18.9	1.5×10^4	0.30	20.0	22.0
全风化花岗岩	摩尔-库仑	排水	18.5	19.3	2.0×10^4	0.27	22.0	24.0
砂土状强风化花岗岩	摩尔-库仑	排水	19.0	19.5	3.0×10^4	0.25	24.0	26.0

表 2 支护结构材料参数表

名称	类型	$EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$	D/m	$W/(\text{kN}\cdot\text{m})$	ν
框架梁	弹性	1.6×10^5	2452	0.429	25.0	0.2
注浆段	弹性	1.6×10^5	—	—	—	—
自由段	弹性	1.5×10^5	—	—	—	—

在进入计算程序后,将整个施工过程划分为六道施工工序,并在每道施工工序后增设一个增量乘子工序用以获取每道工序完成后边坡的安全系数。计算结果收敛,便得到每道工序完成后的边坡稳定性验算结果。

3.2 数值模拟结果分析

对边坡每一级开挖与支护分别进行了模拟分析,最终得到边坡施工各阶段总位移云图。

当对第四级坡进行开挖,从图 2 可以看出,坡脚处产生了较大的变形,且开挖后边坡的总位移量极值达到 66.14 mm,此时计算得到 $\sum M_{\text{sf}}=1.228$,即边坡的安全系数为 1.228,边坡处于稳定状态,且其安全系数已经满足《公路路基设计规范》^[18](JTG D30—2015)所规定的高速路堑边坡稳定安全系数值(安全系数=1.200~1.300)。因此对照原始的设计方案,对四级坡采取液压喷射植草灌的护坡设计是经济合理的,能够满足边坡安全性要求。

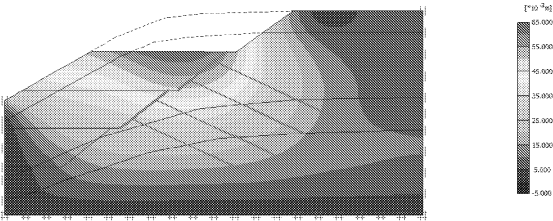


图 2 四级边坡开挖后总位移云图

对三级坡进行开挖,由图 3 可以看出开挖后边坡的总位移相对四级坡开挖后有所减小,但计算得到的边坡整体安全系数有所降低, $\sum M_{\text{sf}}=1.149$,未能满足设计要求,因此需对三级坡进行支护。

对三级边坡增加了预应力锚索框架梁支护后,由图 4 可以看出支护后的坡内土体变形范围有所缩

小,总位移极值由原先的 47.89 mm 降低至 8.17 mm,边坡的安全系数得到了大幅度的提升,达 1.552,满足了规范要求,这也说明预应力锚索对于提高边坡安全性具有很大的作用,其加固效果显著。

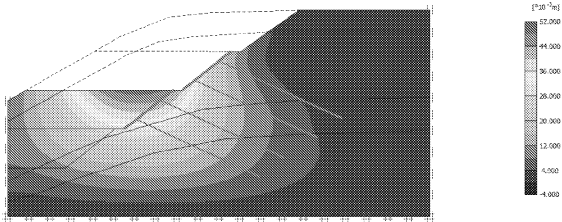


图 3 三级边坡开挖后总位移云图

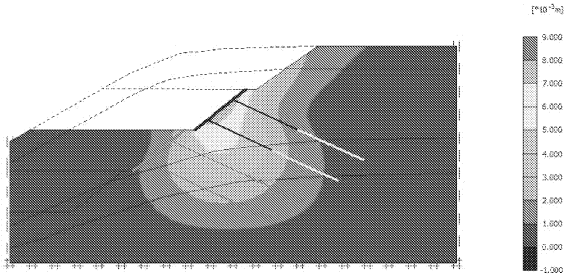


图 4 三级边坡开挖并支护后总位移云图

对二级边坡进行开挖后,边坡的安全系数发生了大幅度的降低,且总位移极值增大至 82.53 mm。由图 5 可以看出此时开挖后的边坡内形成了一条近似圆弧形的滑带,且靠近二级坡坡面处的岩土体位移最大,边坡的安全系数降至 1.182,未达到设计要求。因此,同样对二级坡增设预应力锚索框架梁支护,支护后边坡的安全系数又提升至 1.514,且边坡的总位移得到了很好的控制,极值降低至 10.23 mm,仅在二级坡面附近发生较大的变形,且变形范围缩小,原先的滑带形状发生了变化且趋于消失,锚索加固效果得到了进一步的肯定(见图 6)。

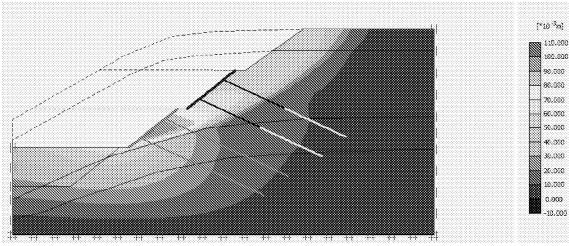


图 5 二级边坡开挖后总位移云图

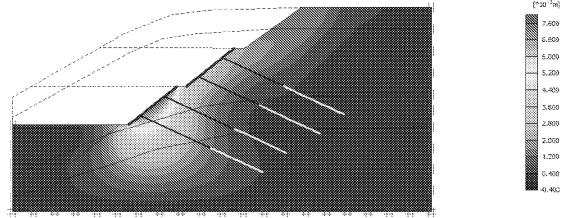


图 6 二级边坡开挖与支护后总位移云图

对一级边坡进行开挖,开挖后边坡的安全系数仍达到 1.236,且总位移极值控制在 36.92 mm,此时边坡处于安全稳定状态,其安全系数介于 1.200 ~ 1.300,满足规范要求。对一级坡面进行液压喷播植草灌护坡便满足了安全性要求,至此,原设计方案的可行性得到了验证。边坡整体开挖支护完成后,由图 7 可见坡体内部存在一条近似圆弧形滑带,相对于二级坡面开挖后,滑带的位置有所后移,且滑带前缘的位置也移动至一级坡的坡脚处,但边坡整体的位移因为支护结构的存在得到了有效的控制,位移相对较小,满足安全性的要求。

图 8 为运用极限平衡法计算所确定的边坡滑带形状,与上述强度折减法所得到的滑带形状较为一致。运用极限平衡法计算得到的边坡支护设计后的安全系数为 1.272,与强度折减法得到的安全系数 1.236 差值仅为 3%,且两种方法所得边坡支护后的安全系数均满足规范要求,由此论证了该支护方案的可行性,也验证了有限元强度折减法对于分步施工边坡稳定性分析的适用性与正确性。

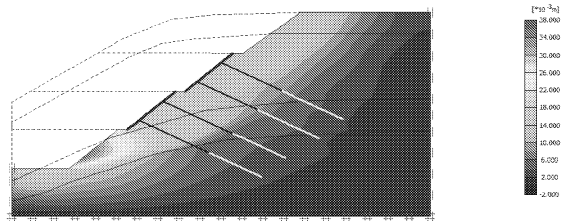


图 7 一级边坡开挖后总位移云图

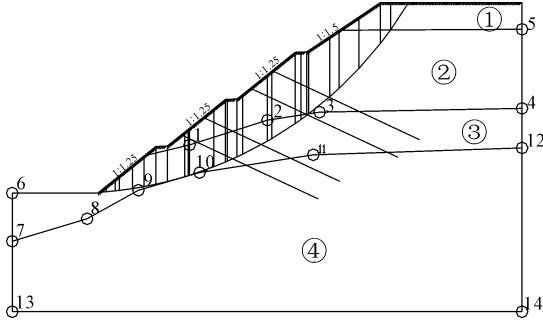


图 8 极限平衡法计算结果图

4 结 论

通过 PLAXIS 有限元软件模拟边坡施工各阶段的变形位移,并将结果与极限平衡法所得结果对比分析,得到以下结论:

(1) 利用强度折减法计算所得到的最终边坡安全系数与极限平衡法计算所得较一致,差值仅为 3%,两种方法所确定的滑带形状也较为一致,验证了强度折减法在分步施工边坡稳定性分析上的适用性与正确性。同时,该模拟结果也验证了边坡支护方案的可行性。

(2) PLAXIS 有限元软件可以较简洁地实现岩土体中各类加固材料的模拟,并可以充分考虑材料的本构模型,不需要假定滑动面与条间力,使得模拟结果更能反映边坡的实际情况,弥补了极限平衡法的不足。

(3) 边坡在开挖过程中其安全系数会随着开挖的进行有所降低,直至不满足设计要求,预应力锚索支护能显著提高边坡安全系数并控制位移,因此分步施工,适时支护,对于保障施工过程以及边坡后期的安全性具有重大意义。

参考文献:

[1] 张雨霏,丁秀丽,卢 波.基于数值分析的岩石块体稳定性评价一般性方法[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):78-92.

[2] 吕群财.土质边坡的稳定性分析与治理技术研究[D].南京:南京大学,2014:2-4.

[3] 贾住平,郑禄璟,姚 松.极限平衡法与有限元强度折减法在露天矿边坡稳定性分析中的应用对比[J].现代矿业,2016,32(9):37-40.

[4] 董晓红,梁桂兰,许忠厚.边坡稳定分析方法综述及发展趋势研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(5):100-102,106.

(上接第 210 页)

- [5] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等.基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):243-256.
- [6] 杨 柳,汪 茜,郑百功.边坡稳定分析方法的研究[J].吉林地质,2013,32(2):103-105.
- [7] 刘 飞.屈服准则对边坡稳定分析影响的研究[D].长沙:湖南大学,2013:2-4.
- [8] 秦 帆,王正中.基于有限元强度折减理论的边坡稳定分析方法探讨与改进[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):43-47.
- [9] 郭子仪,范振华,朱云升,等.边坡稳定性分析中的有限元极限平衡法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(1):79-84.
- [10] 李连祥,张永磊,扈学波.基于 PLAXIS 3D 有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(S1):254-261,266.
- [11] 李小春,袁 维,白 冰,等.基于局部强度折减法的边坡多滑面分析方法及应用研究[J].岩土力学,2014,35(3):847-854.
- [12] 吴丽君.基于 Plaxis 强度折减法的开挖边坡稳定性分析[J].山西建筑,2012,38(33):80-81.
- [13] 周元辅,邓建辉,崔玉龙,等.基于强度折减法的三维边坡失稳判据[J].岩土力学,2014,35(5):1430-1437.
- [14] 陈力华,靳晓光.有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J].土木工程学报,2012,45(9):136-146.
- [15] 张坤勇,杜 伟,李广山,等.土质边坡归一化变形量失稳判据研究[J].长江科学院院报,2017,34(10):1-7.
- [16] 中交第二公路勘察设计院有限公司.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015:56-57.
- [17] 田利勇,于文华,卢育芳.Plaxis 在板桩结构分析中的应用[J].水运工程,2015(4):194-200.
- [18] 公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.