

岫岩小虎岭破碎带边坡稳定性分析

于丹¹,陈俊¹,庄岩²,陈殿强²,王瑞娟¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽宁有色勘察研究院,辽宁 沈阳 110002)

摘要:以岫岩小虎岭工程边坡为例,为了评价和研究含破碎带的岩质高边坡稳定性及抗滑桩加固效果。通过现场大型直剪试验和室内试验获得计算参数,基于数值模拟采用有限元强度折减法分析其稳定性并获得安全系数。结果表明破碎带是影响边坡稳定的主要原因,边坡塑性贯通区与破碎带形状一致;自然状态下安全系数为1.01,属欠稳定坡,采用抗滑桩加固后安全系数提高至1.72;安全系数在一定范围内随破碎带土体的 c 、 φ 值的增大而增大。

关键词:破碎带;边坡稳定性;安全系数;强度折减法;抗滑桩

中图分类号:TU431

文献标识码:A

Stability Research of Xiaohuling Slope with Fracture Zone in the Area of Xiuyan

YU Dan¹, CHEN Jun¹, ZHUANG Yan², CHEN Dianqiang², WANG Ruijuan¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Liaoning Institute of Nonferrous Investigation, Shenyang, China, 110002)

Abstract: The stability of high rock slope which contained fracture zone and the reinforcement effect of anti-slide pile were evaluated and studied based on a practical case of an engineering slope in the area of Xiuyan Xiaohuling. The calculated parameters were obtained via large direct shear strength tests in the local field and laboratory tests, at the same time, the stability and safety factor were analyzed and obtained through numerical analysis based on Strength Reduction FEM. Result indicates that the fracture zone is the key reason to the influence of the slope stability, the area of max shear strain is similar to fracture zone's shape in slope, and the slope belongs to unstable slope in nature status because of the safety factor was 1.01, the safety factor was increased to 1.72 after using anti-slide pile, safety factor of slope along with the andvalue of fracture zone increases in a certain range.

Key words: fracture zone, slope stability, safety factor, strength reduction FEM, anti-slide pile

边坡是工程建设中最常见的一种工程形式^[1]。边坡的稳定性与抗剪强度指标 c 黏聚力 φ 和内摩擦角息息相关,以往的研究成果大多数来自模型试验或者工程经验类比。笔者以岫岩地区某工程高边坡为例,采用工程现场大型直剪试验获得主要岩土体的抗剪强度参数,基于有限元强度折减法(Strength Reduction FEM)来模拟分析含破碎带的工程高边坡的变形失稳机制,并评价其经抗滑桩的加固后的稳定性,为同地区类似工程提供参考。

1 有限元强度折减法

早在70年代有限元强度折减法就提出来了,1975年Zienkiewicz^[2]就利用此法进行边坡稳定性分析,此法限于当时的计算条件没有很好的被广泛应用,近些年来在岩石和土质边坡稳定性分析中得到了逐渐的发展^[3]。此法是建立在土体弹塑性本构关系基础上,考虑了土体应力应变关系,能够快捷的模拟出边坡失稳过程及其滑动面形状,无需提前对滑动面形状作出假设,无需进行条分。

收稿日期:2015-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41072190);沈阳市科学技术计划项目(F13-164-9-00,F13-165-9-00)

作者简介:于丹(1963-),女,辽宁丹东人,教授,主要从事岩土工程研究。

通过对边坡岩土体抗剪强度参数逐渐降低直至计算不能收敛为止,此时程序则可以自动根据弹塑性计算结果得到破坏滑动面(塑性应变和位移突变地带),同时得到边坡的临界破坏的强度折减系数 F_r ,并将此系数作为强度储备安全系数 F_s 。

本文抗剪强度参数 c 、 φ 采用单一强度折减系数 F_r ,即 c 和 φ 保持相同的折减幅度。

$$c_f = c/F_r \quad (1)$$

$$\varphi_f = \tan^{-1}(\tan\varphi/F_r) \quad (2)$$

式中, c_f 和 φ_f 为折减后的土体的黏聚力与摩擦角; F_r 为强度折减系数。

边坡失稳状态的合理判别是运用有限元强度折减法的关键,目前应用较广泛的边坡失稳判别主要有3种:边坡中某点位移发生突变且无限发展;有限元计算不收敛;广义塑性应变或者等效塑性应变在坡体内贯通^[4-5]。本文采用计算不收敛作为边坡失稳判别。

2 工程案例

2.1 工程概况

为满足交通需求,新建兴雅公路位于岫岩满族自治县,公路西侧为大洋河,东侧为在建设过程中开挖山体形成的人工高边坡,公路施工过程中发现边坡发生了滑坡。据公路施工人员介绍,兴雅线公路工程于2014年3月开始兴建,对山体进行削坡开挖,坡向西向,开挖时形成四至五级台阶,但是由于滑坡,目前台阶形状已不明显。

目前滑坡区段近南北走向长约750 m,边坡最高50~55 m,滑坡山体最高处与公路高差69 m,滑坡山体顶部坡角约10°的平台上,因滑坡形成了3~4条近平行的弧状地表裂缝,裂缝最大宽度约30 cm,可见深度大于1.0 m,向下错动最大错距约0.6~0.7 m,为典型的滑坡后缘破裂壁和拉张裂缝带,并形成较明显的滑坡台阶。坡顶植被以杂草为主,局部排水不畅,有轻微沼泽化。在边坡坡面上,由于开挖扰动、卸荷、风化、降雨等的综合作用,边坡坡面层状岩体的岩层面强度降低,出现了沿层面产生平面滑动破坏的浅层滑坡。现场调查出露边坡,岩性为绢云母片岩,节理裂隙很发育,岩体破碎。经对坡顶和坡脚处岩层的倾角、倾向进行观测,由于构造复杂,岩层产状变化较大,倾向西偏北约265°~305°左右,岩层倾角范围30°~55°之间,大部分倾角35°~50°之间,边坡坡向向

西,坡角多在35°~42°之间,岩层倾向与坡面倾向基本一致,为顺向边(滑)坡。

2.2 工程地质

准确获取岩土体抗剪强度参数是评价边坡稳定性分析与加固防治工程设计的关键^[6]。选取场区剖面进行分析。据现场工程地质测绘、钻探揭露,场区地层主要有第四系人工填土(Q_4^{ml}),坡洪积(Q_4^{4dl+pl})碎石土,元古界辽河群盖县组(P_{thgx})绢云母片岩。

2.3 工程试验参数

为测定软弱岩体的抗剪强度,计算岩土体的抗剪强度指标,在现场强风化岩石层进行了大型直剪试验。试验在滑坡体内进行,岩石试验专业技术人员 and 地质人员共同选取强风化绢云母片岩5个试验点,然后进行人工开挖覆盖层2.20 m后至基岩,再凿平浇注混凝土试体,试块尺寸为50 cm×50 cm×35 cm。试验按变形控制法通过千斤顶施加法向荷载,每级按预估最大法向荷载 σ_{max} 的1/4等量递增施加,法向应力分别为80、140、200、230、290 kPa五个等级。当连续两次15 min垂直变形累计不大于0.05 mm时,即认为垂直变形已经稳定,可施加剪切荷载。剪切荷载按最大法向荷载的10%分级等量施加,当施加剪切荷载所引起的剪切变形为前一级荷载的1.5倍以上时,下一级剪切荷载则减半施加。



图1 现场直剪图

Fig.1 The direct shear diagram

在试验过程中,随时观察试体和剪切面以及试体周围岩土变形现象,详细记录或拍照。试验结束后,将试体剪切面上部翻起,测量和描述剪切面的剪损状态,包括缺损情况、起伏情况等。当完成各级垂直荷载下的抗剪强度试验后,应在现场将试验结果初步绘制曲线图,当发现某组数据不合理时,应立即补做该组试验。现场直剪试验准备工作、仪器安装、试验方法及资料整理均按《岩

表1 物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters

序号	名称	重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°
①	破碎带土	18.9	70	0.3	23.7	20.5
②	碎石土	20	12	0.29	5	30
③	强风化片岩	25.3	1 200	0.25	37	33.88
④	中风化片岩	26.6	2 000	0.22	200	35

土工程勘察技术规程现场直剪试验规程》^[7] (DB21/T1564.6 - 2007) 相关要求进行操作。其他岩土体参数通过原位测试、室内试验等方法取得,具体物理力学参数见表1。

3 数值计算

3.1 计算模型及假定

本工程以 GTS NX 为依托,采用有限元强度折减法(Strength Reduction FEM)来模拟分析含破碎带的高边坡稳定性。

计算模型断面,简化为平面应变问题考虑,岩土体采用摩尔-库伦本构模型;由于岩土体和桩相对刚度差异较大,采用界面单元来模拟结构与岩土体之间的界面行为;网格按由疏至密逐渐划分,关键部位采取网格尺寸加密方式划分;边界条件设定为:约束左右两侧的 X 方向位移和底部的 X、Y 方向的位移,上部为自由端;初始按自重应力场考虑。建立如图 2 所示有限元模型,计算模型共划分 2347 个单元,2374 个节点。

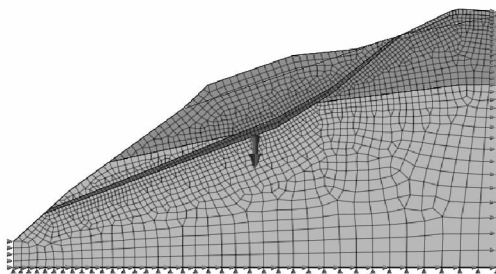


图2 计算模型图

Fig.2 Calculation model

根据《岩土工程勘察规范》^[8]关于公路路堑边坡稳定程度等级可定量划分为:

- 1) 对于新设计的边坡、重要工程安全系数 F_s 宜取 1.30 ~ 1.50;
- 2) 一般工程安全系数 F_s 取 1.15 ~ 1.30;
- 3) 次要工程安全系数 F_s 取 1.05 ~ 1.15;
- 4) 验算已有边坡稳定时, F_s 取 1.10 ~ 1.25。

3.2 计算结果

(1) 自然状态

图 3 为自然坡在进行折减计算后的最大剪切应变云图,图 4 可以看出边坡是沿着破碎带失稳破坏的,剪应力集中范围主要聚集在破碎带区域,滑裂面也与破碎带的形状类似呈折线型,并未在坡体内其他地方形成滑动圆弧,可表明破碎带是导致岩质边坡失稳的主要控制性部位。边坡在自然状态下使用强度折减法得到安全系数为 1.014,而根据 Bishop、Morgenstern - Price 及 Janbu 计算得到的安全系数分别为 1.176、1.170 和 1.162,由此可见强度折减法得到的安全系数较其他三种方法所得的安全系数偏小,相对保守安全一些。因此对含破碎带的高边坡稳定性分析使用有限元强度折减法是可行的。但几种方法计算所得安全系数均不满足规范所要求的稳定性要求,均属于欠稳定边坡,故应进行加固处理来提高其稳定性。

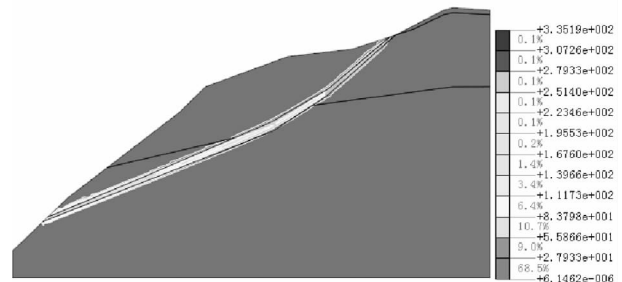


图3 自然坡最大剪切应变云图

Fig.3 The natural slope maximum shear strain contours

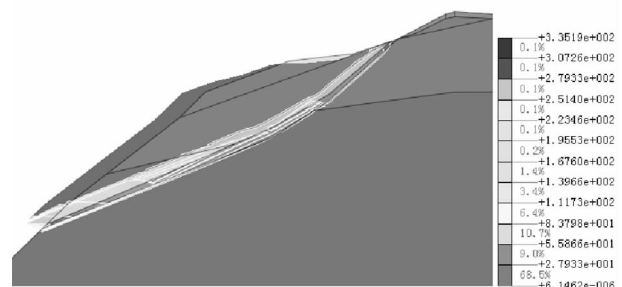


图4 失稳破坏剪切应变云图

Fig.4 Failure strain maximum shear strain contours

破碎带土的抗剪强度指标黏聚力 c 、内摩擦角 φ 对其稳定性也有影响。当保持 c 值不变的情况下, φ 分别取 16° 、 18° 、 20° 、 22° 、 24° 、 26° , 共建立六组模型, 得到的安全系数 F_s 与黏聚力 φ 的关系如图 5(a), 可以看出 F_s 随 φ 的增大而大致呈增长趋势, 但增长幅度不大; 同样在保持 φ 不变的情况下, c 分别取 15、20、25、30、35、40 kPa, 共建立 6 组模型, 得到的 F_s 与 c 的关系如图 5(b), F_s 随 c 的增大而逐渐增大, 但增长幅度不大。

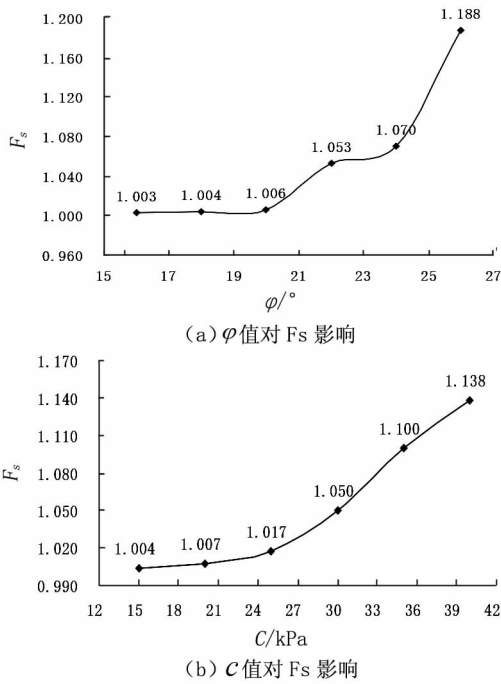


图 5 F_s 与 c 、 φ 关系

Fig.5 F_s relationship with c and φ

(2) 坡顶削坡

从图 6、图 7 可知削坡后的边坡与自然状态下的边坡滑裂面相似, 安全系数为 1.056 也较之仅增大 4.1%, 变化不大。由此可知仅对边坡中上部进行小范围的削坡对其稳定性提高程度不大, 因此需采取其他加固措施来提高边坡的稳定性。

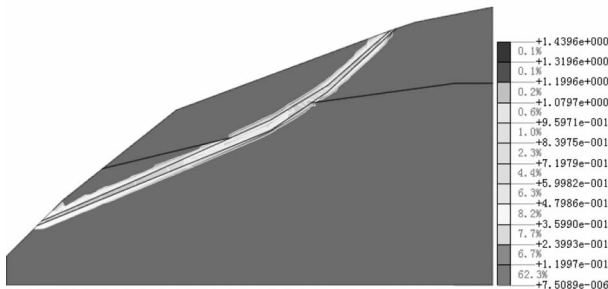


图 6 削坡后最大剪切应变云图

Fig.6 After cutting slope of maximum shear strain contours

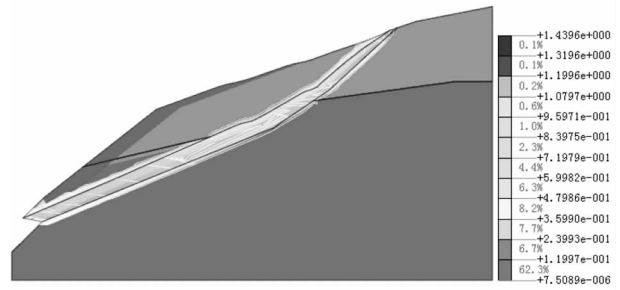


图 7 失稳破坏剪切应变云图

Fig.7 Failure strain maximum shear strain contours

(3) 抗滑桩加固

根据边坡地层性质、推力大小、滑面坡度及覆土厚度, 本工程在边坡中上部设置抗滑桩加固边坡, 设前后两排。单桩前后错开排列, 桩间距根据滑坡推力、桩截面尺寸等采用工程类比分析确定为 8 m。锚固深度穿透滑移面进入滑面以下稳定的中风化片岩中, 嵌入深度为 1/4 桩长。从图 8 可以看出抗滑桩加固后的边坡安全系数为 1.721, 较自然状态下边坡增长 69.7%, 满足规范要求的安全值, 另外在坡体内未沿破碎带形成塑性贯通区, 也未出现整体的圆弧滑动面, 抗滑桩这种介质很好的抑制了塑性贯通区趋势的发展。

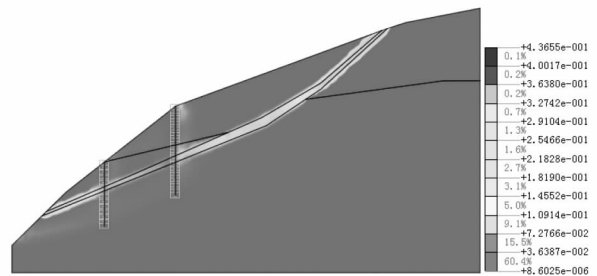


图 8 抗滑桩加固后最大剪切应变云图

Fig.8 Anti-slide pile maximum shear strain contours after reinforcement

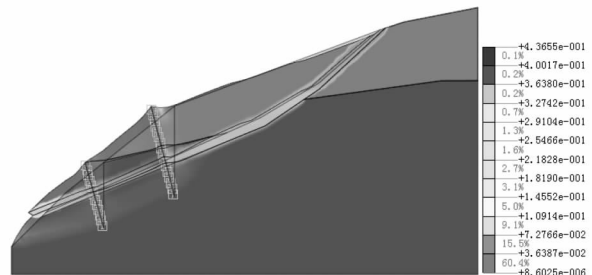


图 9 失稳破坏剪切应变云图

Fig.9 Failure strain maximum shear strain contours

从图10可以看出桩身弯矩及剪力在桩嵌入中风化片岩区域发生突变,第一排在桩入土5 m处达到峰值,第二排在桩入土8 m左右达到峰值,这两处均是抗滑桩与中风化片岩的初始嵌入部位,即悬壁桩的固定端处。表明抗滑桩足以抵抗滑体的推力,起到了加固的作用。然而最大剪应力区域转移至坡脚部位,但其安全系数较大,不会出现滑坡现象。

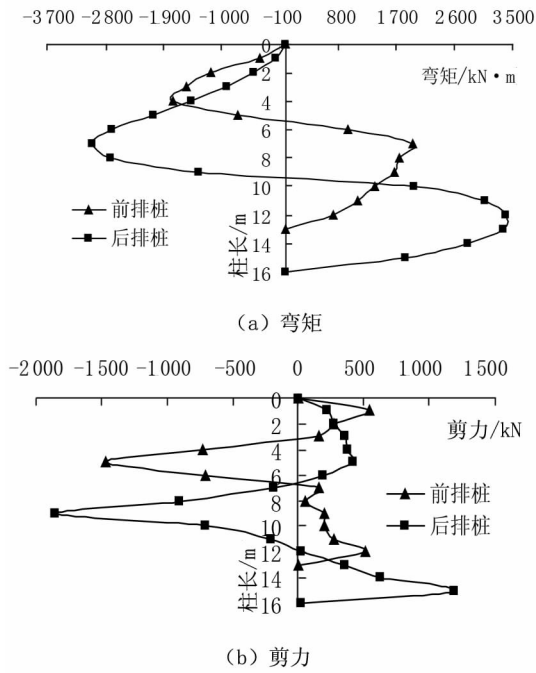


图10 桩身内力图

Fig.10 Internal force diagram of pile

4 结论

1) 准确获得岩土体抗剪强度指标是高边坡稳定性分析与加固防治设计的关键。选取强风化片岩场地进行大型直剪试验作为评价边坡稳定性及边坡加固设计的重要依据。

2) 对含有破碎带的高边坡稳定性问题,采用

强度折减法具有可行性,且计算所得结果较其他方法偏安全。

3) 破碎带是控制岩质高边坡稳定性的关键部位,均沿其进行破坏,且滑裂面与破碎带形状一致;边坡的 F_s 在一定范围内随破碎带土的抗剪强度指标、值的增大而逐渐增大,但增长幅度不大。

4) 本工程仅采用边坡中上部削坡方案对提高稳定性帮助不大,采用抗滑桩加固边坡具有明显增强作用,能有效减弱破碎带对边坡的威胁,边坡安全系数有大幅提高,并可为同地区类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 朱大勇,姚兆明. 边坡工程[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2014.

[2] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non - associated visco - plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975,25(4): 671 - 689.

[3] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(19): 3381 - 3388.

[4] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳. 极限分析有限元法讲座 - 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学,2005, 26(2):332 - 336.

[5] 肖特,李典庆,周创兵,等. 基于有限元强度折减法的多层边坡非侵入式可靠度分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4):718 - 732.

[6] 魏翠玲,吕博. 含硬性贯通结构面的岩质边坡稳定性研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2012,29(4):9 - 12.

[7] DB21/T1564,岩土工程勘察技术规程现场直剪试验规程[S].

[8] GB 50021 - 2009,岩土工程勘察规范[S].

(责任编辑 李军)