

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.06.041

基于 3DEC 对岩质高边坡的稳定性分析

倪 勇¹, 王述红²

(1. 中国十九冶集团有限公司, 四川 成都 610091;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 结合辽宁省境内建兴高速公路某高边坡的施工过程, 利用现代非接触测量技术采集岩质边坡结构面信息, 采用赤平投影技术对边坡结构面进行分组, 从而判断出坡面与节理结构面的空间关系, 识别出施工过程中可能出现岩块滑落的区域。然后, 在此基础上采用大型三维离散元软件 3DEC 模拟边坡采用不同的台阶数进行开挖, 通过监测边坡岩体位移的变化, 找出该岩质边坡不稳定块体存在的位置, 并得出采用 5 级台阶开挖时, 边坡岩体的位移量最小, 边坡的稳定性更好, 从而指导该边坡工程在开挖过程中的安全施工, 以及为边坡的后期支护提供理论依据和参考。

关键词: 岩质边坡; 结构面分组; 赤平投影; 3DEC; 稳定性分析

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)06-0206-05

Stability Analysis of High Rock Slope based on 3DEC

NI Yong¹, WANG Shuhong²

(1. China 19th MCC Group Chengdu Construction Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610091, China;

2. School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Combining with the construction process of Jianchang - Xingcheng highway high slope in Liaoning province, modern non-contact digital measurement technology is adopted to collect information on rock slope structural plane and stereographic projection technique is used to group structural planes, which will help judge spatial relationship of slope surface and joint structure. Then the probable slipping zone in the process of excavation can be identified. Based on these, large 3D discrete element software 3DEC is adopted to simulate progress of slope excavation, from which the displacement will be calculated to find out the instability blocks' position. Then important reinforcement positions can be provided and treatment measures are taken to ensure the safe of slope excavation, which provides a theoretical basis and reference with the support of the slope in the future.

Keywords: rock slope; structural surface group; stereographic projection; 3DEC; stability analysis

岩质边坡的失稳破坏往往伴随着复杂的地质变化过程, 然而坡体内部结构复杂和构成坡体的岩土体物质多样, 致使边坡在发生破坏时具有不同的损伤模型^[1-3]。边坡在不同的破坏模式下, 其结构面形式和形成条件存在较大差异, 所以针对不同的边坡破坏形式应选择相应的计算分析方法来确定其稳定性。目前, 边坡稳定性分析方法分为定性分析法和定量分析法。近年来, 计算机科学的发展以及非线性力学、非确定性数学、遗传算法、系统科学、进化

计算等新兴学科的兴起, 将全新的思考方式注入到边坡的稳定性分析中, 从而产生了新的分析方法, 为研究边坡工程及类似工程提供了有力的理论依据^[4-8]。

定性分析方法^[9-10]可以充分整合影响边坡稳定性的各种因素, 从而较快地对边坡的稳定性及其发展趋势进行评估。主要方法有: 工程地质分析、图形法(极射赤平投影法)、分析数据库和专家系统法等。

收稿日期: 2017-06-29

修稿日期: 2017-08-23

作者简介: 倪 勇(1989—), 男, 四川内江人, 硕士, 工程师, 主要从事建筑、市政施工技术方面的研究工作。E-mail: ny19890131@126.com

通讯作者: 王述红(1969—), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 主要从事节理岩体工程特性研究工作。E-mail: shwangneu@126.com

定量分析方法^[11-12]是考虑结构面的受力特性,利用力学原理来评判边坡的稳定性,严格意义上说,该方法对边坡的稳定性还达不到百分之百的定量分析,仅仅可以视为半定量分析。边坡稳定性定量分析有三种:模糊综合评判法^[13]、极限平衡法^[14]和数值法^[15](非连续变形分析、边界单元法、离散有限单元法、数值流形方法等)。

文章以辽宁省建兴高速公路第七合同段的岩质高边坡为研究对象,该处高边坡达 40 余米,地表浮土较浅,因此可不考虑地表应力对边坡结构稳定性的影响,边坡的稳定性由岩体节理结构面决定。

1 工程概况

建兴高速公路第七合同段位于建昌县的东北方向 40 km 处,处于阴山纬向构造体系中,地质构造十分复杂,按构造体系可分为东西向构造、南北向构造。受构造影响,区内断裂较为发育,以东西向和南北向断裂为主。该处高边坡纵向长度 100 余米,边坡高度有 40 m,台阶法进行放坡开挖,分为五级台阶,每一级台阶开挖深度 8 m,每级台阶底部设置平台,宽度 2 m,第一级台阶的坡度系数为 1.4,其余台阶的坡度系数为 0.25。地层主要由中密砂土、第三纪砂岩、中风化页岩、微风化花岗岩组成,如图 1 钻孔地层图所示。

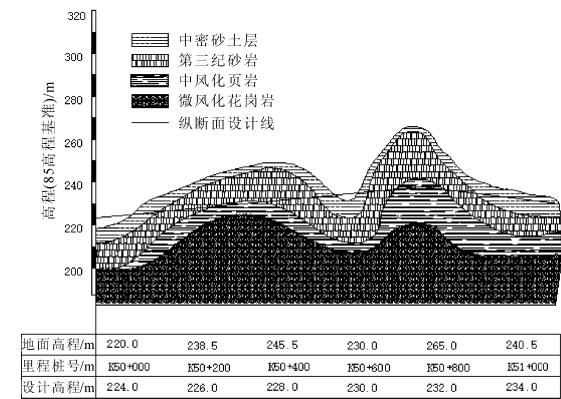


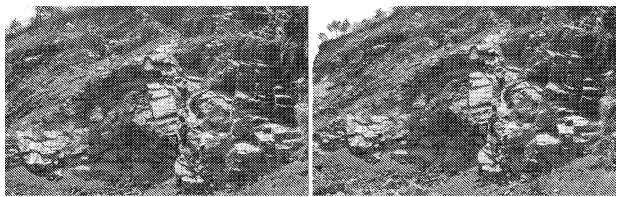
图 1 边坡地质层状图

本文的思路是对边坡进行现场结构面产状信息的采集,利用极射赤平投影法定性地判断边坡是否能形成不稳定块体,同时采用 3DEC 软件建立边坡的离散元模型及模拟开挖,在模型中设置观测点,观察挖掘过程中边坡岩体位置和位移的变化情况,找出力和位移值较大的部位,进而判定出边坡不稳定部位,从而提出岩体需重点监测和加固位置,指导边

坡工程的安全开挖。

2 现场结构面信息采集

本文所采用的数据采集方法为现代非接触数字测量,该方法具有精度高、信息面广优势,并可将岩体结构面进行分组^[16]。本文采集了该工程项目建昌段 57 km 处的现场高边坡图,如图 2 所示。



(a) 左图 (b) 右图

图 2 边坡实物图

提取节理信息:岩体节理结构面的信息在 JMX 中提取和分析,小盘岭边坡的结构面信息处理结果如图 3 所示,主要有 3 组:结构面 J1, 14 组;结构面 J2, 18 组;结构面 J3, 10 组。岩体的结构面信息通过 ShapeMetriX3D 软件提取,主要参数有:结构表面的倾向、倾角、迹线长度以及三维坐标,其中控制着岩体结构面分布规律为倾向和倾角,倾向和倾角对岩质边坡的稳定性起着至关重要的作用^[17]。

结构面整理信息见表 1。



图 3 结构面信息获取图

表 1 结构面信息整理表

组别	倾向/(°)	倾角/(°)
结构面 J1	141	58
结构面 J2	264	24
结构面 J3	174	62
坡面	120	79

3 极射赤平投影进行稳定性分析

岩质高边坡在施工过程中的稳定性除了受施工

扰动不可避免的影响,节理结构面分布和发育程度以及它们之间的空间组合关系主要控制着边坡的安全。根据极射赤平投影法分析边坡稳定性的方式,该段边坡结构面的赤平投影图如图 4 所示。

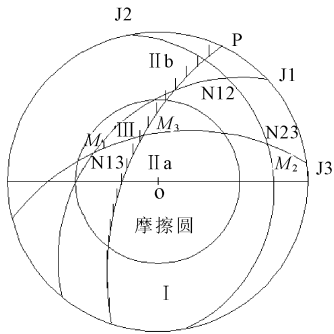


图 4 边坡赤平投影图

图中节理结构面的圆弧顶点分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 ,节理结构面 J1 与节理结构面 J2 的组合线 N12,节理结构面 J1 与节理结构面 J3 的组合线 N13,节理结构面 J2 与节理结构面 J3 的组合线 N23,它们的产状信息见表 2。然后对这些结构面及其组合线关系作出赤平投影稳定性分析。

表 2 结构面交线信息

组别	倾向/(°)	倾角/(°)
N12	215	17
N13	147	60
N23	254	25

分析结果: M_1 、 M_3 位于 III 区,则节理面 J1、J3 的倾向与边坡的倾向相同,其倾角小于边坡的倾角,大于内摩擦角,属于危险节理面; M_2 位于 I 区, M_1 、 M_3 位于 III 区,则节理面 J2 的倾向与边坡的倾向相反,其倾角小于边坡的倾角,属于稳定节理面。组合线 N12、N23 都位于 I 区,则其倾向与边坡倾向相反,且倾角小于边坡倾角,不会使边坡产生不稳定块体;组合线 N13 位于 III 区,其倾向与边坡倾向相同,其倾角大于内摩擦角,并且小于边坡倾角,符合边坡的破坏损伤条件,即这两组结构面切割边坡岩体时生成了可能沿组合线 N13 方向滑动或冒落的楔形块体,使边坡处于不稳定状态。因此需要通过数值分析再次确定不稳定块体的位置,从而提出支护措施以提高边坡的稳定性,保证施工过程的安全。

4 3DEC 软件数值模拟

20 世纪 70 年代,由 Cundall 等人提出组合体的概念,即岩体是由软弱结构面分割后的块体组成的

结合体,此时岩体的强度由软弱面控制。15 年之后 Cundall 团队开发出了三维离散元软件 3DEC,并运用于岩体稳定性分析中。

离散元的物理方程: $F' = K' \times U'$;运动方程: $a = F_{\text{合}}/m$;其中 F' 为块体之间力的法向分力, K' 为法向刚度系数, U' 为相对位移量, a 为加速度, $F_{\text{合}}$ 为岩体所受合力, m 为岩块的质量。

边坡计算模型的边界范围取值: X 方向为 200 m(满足边坡高度的 5 倍), Y 方向为 80 m(满足边坡高度的 2 倍), Z 方向为 50 m(根据现场情况取值)。

计算边界条件设置:在 XOZ 平面内,限制模型下边界的位移;在 YOZ 平面内,限制左右边界 X 方向的位移;在 XOY 平面内,限制前后两侧边界 Z 方向的位移;模型的上部为开挖面,即为自由边界,允许岩体表面及结构单元体产生较大的位移和变形;施加的荷载选择自然重力应力场。本文中暂不考虑地表水、承压水和自然灾害等对边坡稳定性的影响。

(1) 参数选取。根据小盘岭边坡的地勘报告和水文条件及室内外岩体工程试验及相关标准规范,边坡岩体的力学参数在小盘岭边坡模型中按表 3、表 4 取值。

表 3 岩体力学参数

岩石名称	弹性模量 E/MPa	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c $/\text{kPa}$	张拉强度 σ_t/MPa
砂岩	20.3	0.36	25.6	6.8	26.9	28.00
石灰岩	28.3	0.30	22.8	11.5	42.0	6.63
页岩	12.1	0.28	9.1	4.6	14.3	39.20
花岗岩	74.1	0.20	44.0	30.3	50.6	54.40

表 4 节理裂隙力学参数取值表

节理裂隙	切向刚度 K_s $/(\text{kPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	法向刚度 K_n $/(\text{kPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	黏聚力 c $/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度 σ/MPa
节理裂隙面	120	120	11.5	15.0	0.020
压破碎带	100	100	9.5	11.0	0.016
层面	150	150	15.5	18.5	0.023

(2) 稳定性判别。节理结构的岩质边坡稳定性可根据模拟开挖过程中每级台阶上的监测点位移变化情况来判别。根据工程试验,当监测到边坡岩体的位移等于或大于开挖深度的 1‰时,即本文模拟的高边坡开挖深度达 50 m,当监测的位移值达到 5 cm 时,可认为该监测点所处位置的边坡岩体发生了破坏,甚至出现块体滑落。故通过监测开挖每一级台阶平台上监测点竖向位移的变化情况,当某个位

置点的竖向位移达到 5 cm 时,即可判定该处边坡岩体不稳定,局部块体甚至发生了脱落,相反的情况,该处边坡处于相对稳定的状态。

(3) 数值模拟分析。由于该段边坡第 1 级台阶为砂土层,因而不考虑其节理裂隙的影响。因此对边坡的第 2~5 步开挖进行分析,从第 2 级台阶开始每级台阶布置 5 个监测点,每开挖一级台阶监测一次,模型建立及测点布置见图 5,设计开挖计算步数 3 000 步,模型的初始平衡位移为 2.4 cm。

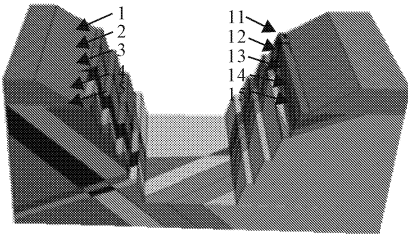


图 5 边坡模型及测点布置图

图 6 为左测监测点位移曲线变化趋势,左侧边坡测点 1、2 在 2~5 步开挖过程中位移变化逐渐增大,而其他监测点位移量变化较小,且都小于 $(5.0 + 2.4)$ cm,得出在测点 1、2 附近出现了不稳定块体,且块体的位移量远大于 $(5.0 + 2.4)$ cm,则边坡在坐标位置 $(19,24,5)5.0$ m 范围内的块体将会出现滑落或者冒落,故在进行边坡开挖时应在该处进行加固支护。

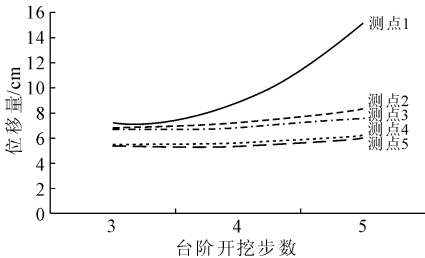


图 6 监测点 1、2、3、4、5 在每步台阶开挖下的位移量

图 7 显示了右侧边坡各监测点的位移量,变化较小且都小于 $(5.0 + 2.4)$ cm,所以可认为右侧边坡处于稳定状态。可见,3DEC 数值模拟的结果是与赤平投影分析的结论是相吻合的。

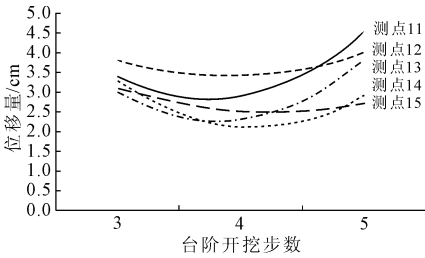
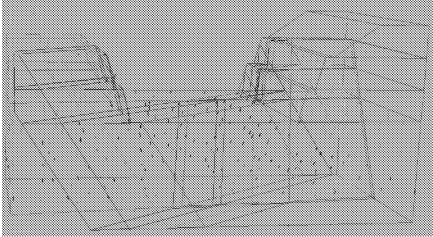
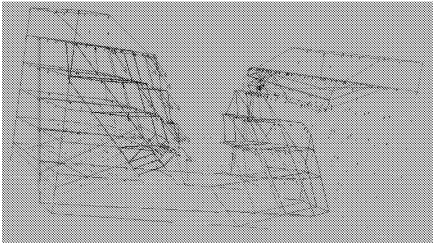


图 7 监测点 11、12、13、14、15 在每步台阶开挖下的位移量

图 8 显示了边坡岩体的位移矢量,左侧边坡不稳定块体出现区域的位移矢量是随着边坡开挖深度的增加而逐渐增大的,符合位移量变化的结果,进而说明了该高边坡是不稳定的,在施工过程中极易出现块体滑落或冒落的现象,因此在监测点 1、2 的 5.0 m 范围应采取锚杆加固,且锚杆长度不应小于 10 m。



(a) 开挖第3台阶时



(b) 开挖第5台阶时

图 8 开挖第三、五级台阶时岩体内部的位移矢量图

(4) 锚杆加固。根据前面模拟的结果,在位移量超过 7.4 cm 的监测点位置进行锚杆加固。在进行添加锚杆支护后,左侧边坡监测点 1、2 的位移量明显减少,各监测点的位移量都小于 7.4 cm,说明经过锚杆支护后,边坡处于稳定状态。

5 结 论

本文在总结了边坡稳定性分析已有方法的基础上,将极射赤平投影分析法与适用于节理化岩体的离散元软件 3DEC 相结合,对建兴高速公路第七合同段的高边坡进行了结构面特性调查和稳定性分析,得到如下结论:

(1) 根据结构面信息调查的结果,对边坡初步进行赤平投影法分析,得出结构面 J1 和 J2 交线的倾向与左侧边坡相同,且倾角小于边坡坡角,为危险节理面,将产生不稳定块体,影响边坡的整体稳定性。而在右侧边坡,交线的倾向与边坡的倾向相反,倾角小于坡角,右侧边坡处于稳定状态。

(2) 根据监测点的位移变化图和位移矢量图,得出由于节理结构面切割形成的不稳定块体,随着边坡的开挖,临空面的增加,不稳定块体将出现冒

落、掉落现象。因此,在边坡的开挖过程中,不能采用开挖完成后一次支护,而应该采取一边开挖一边支护,从而保证工程开挖的安全。

(3) 合理地选择 3DEC 软件对该边坡进行数值模拟,较准确地确定了该段边坡不稳定块体形成的所在位置以及影响范围,并进行锚杆加固,得到了较好的效果,为该边坡实际施工的安全提供理论指导,为边坡的后期支护方案提供参考依据。

参考文献:

- [1] 任海军,童志强,张可能.缓倾层状高边坡变形特性及稳定性分析[J].施工技术,2011,40(15):98-101.
- [2] Wang Shu-hong. Enhancing block rock failure understanding through Geosma - 3D numerical analysis[C]// International Symposium on Rock Mechanics "Rock Characterization, Modeling and Engineering Design Methods". Hong Kong:[s.n.], 2009:19-22.
- [3] 徐奴文,唐春安,周 钟,等.岩石边坡潜在失稳区域地震识别方法[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):893-900.
- [4] 年廷凯,刘 凯,黄润秋,等.多阶多层复杂边坡稳定性的通用上限方法[J].岩土力学,2016,37(3):842-849.
- [5] 王衍汇,倪万魁,石博溢,等.延安新区黄土高填方边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5):52-56.
- [6] 张卫中.向家坡滑坡稳定性分析及动态综合治理研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [7] Shah P H, Batra R C. Through - the - thickness stress distributions near edges of composite laminates using stress recovery scheme and third order shear and normal deformable theory[J]. Composite Structures,2015,131:397-413.
- [8] 刘新荣,涂义亮,钟祖良,等.基于能量突变的强度折减

法边坡失稳判据[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(6):2065-2072.

- [9] Kodama J, Nishiyama E, Kaneko K. Measurement and interpretation of long-term deformation of a rock slope at the Ikura limestone quarry[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mineral Sciences,2009,46(1):148-158.
- [10] Zhao B, Xu W Y, Meng Y D, et al. Security monitoring of a large-scale and complex accumulation slope: an application in the Xiluodu hydropower station[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2015,74(2):327-335.
- [11] 赵 博,赵亚琼.边坡稳定性能的判定方法研究及其工程应用[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):25-29.
- [12] 喻和平,袁明明,张 聪,等.基于弹塑性区间有限元的边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):132-135.
- [13] 李彰明.模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J].岩土力学与工程学报,1997,16(5):490-495.
- [14] 孙 超,吕一彦,吴继敏.大型堆积体边坡极限平衡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):147-150.
- [15] Scholtes L, Donze F V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2012,52(6):18-30.
- [16] 穆嫩江,王述红,石 雷,等.岩质边坡开挖空间块体表征与动态失稳滑落安全稳定性评价[J].安全与环境学报,2012,12(2):146-150.
- [17] 任 刚,邢 民,荆艳会,等.受控于结构面的岩质高边坡失稳预测技术研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):48-53.

(上接第 180 页)

- [8] 陈德新,庞辉春.冷却塔风机驱动专用混流式水轮机:CN201250750[P].2009-06-03.
- [9] 张飞狂.冷却塔水轮机:CN2530233[P].2003-01-08;
- [10] 李大应,金先培.冷却塔用反击式水轮机:CN201071779[P].2007-06-11.
- [11] 李大应,金先培.冷却塔用水动力风机:CN101074677[P].2007-11-21.
- [12] 陈德新,庞辉春.冷却塔风机驱动专用超低比转速混流式水轮机转轮:CN101555859[P].2009-10-14.
- [13] 周大庆,郑 源,顾星康,等.一种超低比转速混流式

水轮机:CN101482083[P].2009-07-15.

- [14] 管 将,胡静宁,徐 燕,等.叶轮叶片数对液力透平性能的影响[J].中国农村水利水电,2013,(11):132-135.
- [15] 袁寿其,吴登昊,任 芸,等.不同叶片数下管道泵内部流动及振动特性的数值与试验研究[J].机械工程学报,2013,49(20):115-122.
- [16] 王 洋,王维军,刘洁琼.基于 Fluent 的叶片数对低比转速离心泵内部流场的影响[J].中国农村水利水电,2011(12):148-150,155.