

Research on the Sliding Failure of Tunnel Side and Back Slopes Based on the Safety Factor Method

Xiao Liu

Henan Jiaotou New Energy Development Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

Based on the ancient top carbonaceous mudstone tunnel, combined with the sliding and cracking conditions of the tunnel portal slope, the independent block safety factor method was used to analyze the overall sliding trend of the slope, and the quantitative index of the safety factor of the overlying block of the slope was established. Taking the portal slope of the ancient top carbonaceous mudstone tunnel as the calculation model, a case study was conducted to obtain the actual block safety factor, and the accuracy of the safety factor method was verified by the discrete element method. The research results show that the safety factor of the tunnel slope block increases with the increase of the position; the larger the safety factor of the slope block, the stronger its resistance to sliding, and the smaller the displacement of the block; the independent block safety factor method can accurately analyze the stability of the slope.

Keywords

Tunnel Engineering; Side and Back Slopes; Sliding Failure; Independent Block Safety Factor Method; Discrete Element Analysis

基于安全系数法的隧道边仰坡滑移破坏研究

刘晓

河南交投新能源发展有限公司, 中国·河南 郑州 450000

摘要

以其古顶炭质泥岩隧道为依托, 结合隧道洞口边仰坡滑移开裂情况, 采用独立块体安全系数法分析边仰坡整体滑移趋势, 建立边仰坡上覆块体安全系数量化指标。以其古顶炭质泥岩隧道出口段边仰坡为计算模型, 进行算例分析, 得出实际块体安全系数, 并利用离散元法验证安全系数法准确性。研究结果表明: 隧道边仰坡块体安全系数随所处位置升高而增大; 边仰坡块体安全系数越大, 其抵抗滑移能力越强, 块体产生位移越小; 独立块体安全系数法可较为准确地分析边仰坡稳定性。

关键词

隧道工程; 边仰坡; 滑移破坏; 独立块体安全系数法; 离散元分析

1 引言

炭质泥岩等不良地质区隧道的建设存在诸多问题, 尤以隧道洞口边仰坡滑移开裂为甚。诸多学者对隧道边仰坡稳定性进行了研究: 董永等^[1]利用有限元强度折减法得出了公路隧道边仰坡稳定性系数, 并预测出边仰坡滑移模型; 王树英等^[2]对连拱隧道边仰坡进行现场测试, 综合各种因素分析滑移原因并提出整治措施; 刘小兵等^[3]利用圆弧转动破坏法确定了边仰坡的塑性区范围; 张运良^[4]研究了边仰坡滑塌处置措施及二次进洞施工技术; 曹亮宏等^[5]研究了隧道洞口边仰坡滑移机理; 朱合华等^[6]对受施工扰动影响的洞口边仰坡进行了三维有限元分析研究; 卢海峰^[7]利用安全系数法研究顺层岩体滑移趋势; 高峰等^[8]运用 UDEC 离散元分析研究了埋深、节理结构和围岩级别对隧道围岩稳

定性的影响。沈华章等^[9]通过离散元分析研究边坡位移矢量变化及稳定性。本文以其古顶隧道出口段施工边仰坡滑移为例进行研究, 利用独立块体安全系数法对炭质泥岩隧道边仰坡稳定性进行分析, 并采用离散元模拟验证安全系数法正确性, 以期得到量化的块体安全系数来评价坡体稳定性、推测坡体滑移趋势, 指导依托工程施工。

2 工程概况

其古顶炭质泥岩隧道左、右线隧道洞口围岩主要由炭质泥岩组成, 岩体极破碎, 稳定性差。右洞 K11+505~495 段初支拱腰出现鼓包开裂, 右洞洞顶仰坡裂缝较大。监控量测数据显示, 其古顶隧道出口右洞 K11+480 处, 右顶沉降 36mm, 拱顶中沉降 16mm, 左拱顶沉降 14mm。经现场踏勘发现洞口右侧边仰坡出现长约 60m、宽 3~30mm 的贯穿裂缝, 其周边零星分布长 3~10m 的小裂缝; 套拱拱顶左侧出现长 0.7m、宽 3mm 裂缝, 洞口仰坡挂网喷砼出现多处开裂。边仰坡持续沉降导致 K11+486~490 段初支混凝土出现侵限。

【作者简介】刘晓 (1995-), 男, 中国河南淇县人, 硕士, 助理工程师, 从事隧道工程研究。

3 隧道边仰坡稳定性分析

3.1 独立块体安全系数法

根据工程实际,将边仰坡滑移面上岩体按节理发育情况分为多个独立块体,对既有安全系数积分求得安全系数储备量,比较开挖前后安全系数差异,通过分析不同块体开挖前后安全系数差异来研究施工扰动对坡体的影响。

3.2 安全系数推导

以坡脚为原点,沿坡体走向反方向设为 X 轴,竖向为 Y 轴,建立直角坐标系。如图 1 所示: A 点为潜在滑移面与开挖面交点(开挖后),B、C 分别为开挖面坡脚、坡顶点,D 为计算顶点。 α 为滑移面倾角, β 为自然坡面倾角。A、B、C、D 的坐标分别为 (x_a, y_a) (x_b, y_b) (x_c, y_c) (x_d, y_d) 。

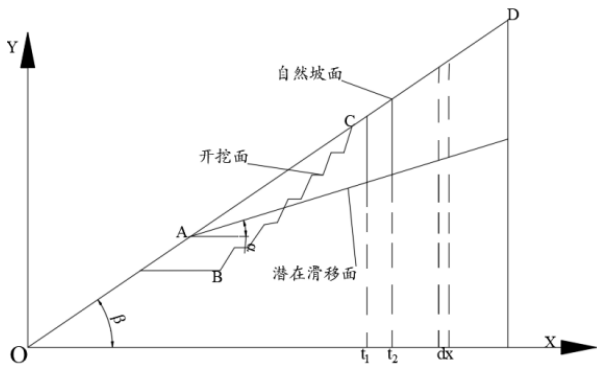


图 1 边仰坡计算模型

自然坡面方程:

$$y_1 = \tan \beta x \quad (1)$$

潜在滑移面方程:

$$y_2 = y_a + (x - x_a) \tan \alpha \quad (2)$$

第 k 级开挖面方程:

$$y_k = y_c + \sum_{n=1}^{k-1} h_n + \tan \alpha_k \left[x - \left(x_c + \sum_{n=1}^{k-1} h_n / \tan \alpha_k + \sum_{n=1}^{k-1} p_n \right) \right] \quad (3)$$

其中:

$$\left(x_c + \sum_{n=1}^{k-1} h_n / \tan \alpha_k + \sum_{n=1}^{k-1} p_n \right) \leq x < \left(x_c + \sum_{n=1}^k h_n / \tan \alpha_k + \sum_{n=1}^{k-1} p_n \right) \quad (4)$$

$$F_{\text{阻力}} = \gamma f \cos \alpha \int_{t_1}^{t_2} [ax + b - y_a - (x - x_a) \tan \alpha] dx$$

$$F_{\text{潜力}} = \gamma \sin \alpha \int_{t_1}^{t_2} [ax + b - y_a - (x - x_a) \tan \alpha] dx$$

即独立安全系数为 $w = F_{\text{潜力}} / F_{\text{阻力}}$, 当 $w > 1$ 时坡体保

持稳定, 当 $w < 1$ 时坡体失稳破坏。

上式中: h_n 代表第 n 级坡垂直高度, p_n 代表第 n 级坡宽度, α_k 代表 k 级开挖面倾角, γ 代表岩体重度, f 代表节理面摩擦系数。 t_1 、 t_2 代表独立块体左右限值。

3.3 算例分析

以其古顶炭质泥岩隧道出口段边仰坡为计算模型, 将潜在滑移体分割为 10 个独立块体, 见图 2。开挖面开挖四级坡面, 台阶宽均为 2m, 垂直高均为 7.5m, 坡比分别为 1 : 0.75、1 : 1、1 : 1、1 : 1。取 $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $\gamma = 2.7 \times 10^4 \text{ N} / \text{m}^3$ 。B、C、D 坐标分别为 (28.9, 16.4) (59.7, 45.6) (82.2, 72.5), 将各参数代入 (3) 式可得 A (22.8, 19.8)。分别对 10 个块体开挖前后安全系数进行计算, 得到各块体开挖前后安全系数曲线, 如图 3 所示。

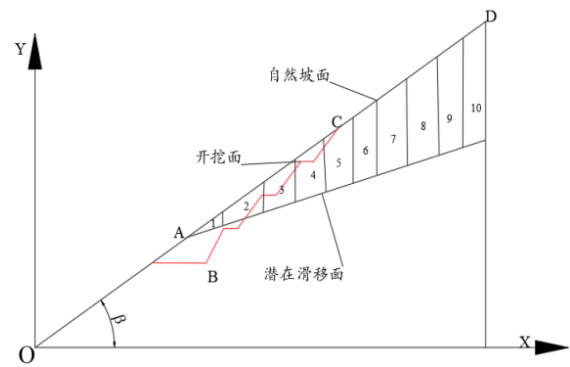


图 2 边仰坡算例计算模型

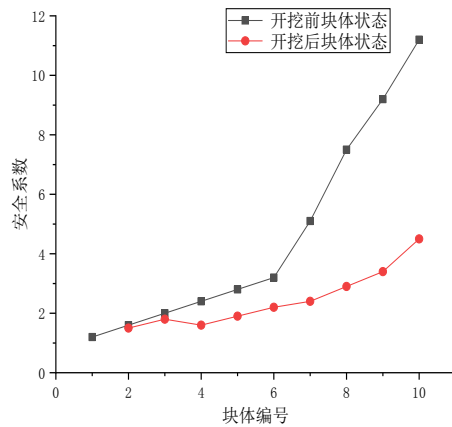


图 3 块体安全系数曲线图

由算例可知: 隧道开挖后安全系数较之开挖前整体偏小, 即开挖扰动对上覆各块体稳定性产生不利影响。开挖前, 块体安全系数分布随块体位置的升高而升高; 开挖后, 部分块体被清除, 块体安全系数分布规律基本和开挖前一致, 但未被清除的个别块体(块体 4)安全系数稍小于临近下方块体, 这是由于块体间的支挡作用造成的。独立块体安全系数法的提出为隧道边仰坡滑移破坏提供了量化的数据指标, 可为相关工程提供借鉴。

4 离散元法模拟隧道边仰坡滑移

采用离散元 UDEC 计算软件模拟边仰坡滑移开裂，以本文算例分析构造计算模型。围岩自重及岩体间侧向压力构成初始应力场，侧向压力系数 0.64，以 45° 和 135° 作为岩体基本节理角度并以此划分块体，在滑移体内构造 9 条竖向节理将滑移体分割为等宽的 10 个独立块体，相应的隧道岩体节理组内各结构面以相同的长度 2.0m 区隔出来。开挖前

后计算模型、开挖前后围岩位移矢量图如图 4 所示。

由图 4 可知，边仰坡在隧道开挖前后上覆岩体围岩位移矢量有较大差异。开挖后边仰坡各块体位移矢量都大于开挖前，开挖前坡体 X 向最大位移矢量为 1.209E-01m；开挖后 Y 向最大位移矢量为 1.874E-01m；随着块体位置的升高（即安全系数的增大），块体 Y 向位移缓慢减小，离散元模拟验证了算例分析结论的正确性。

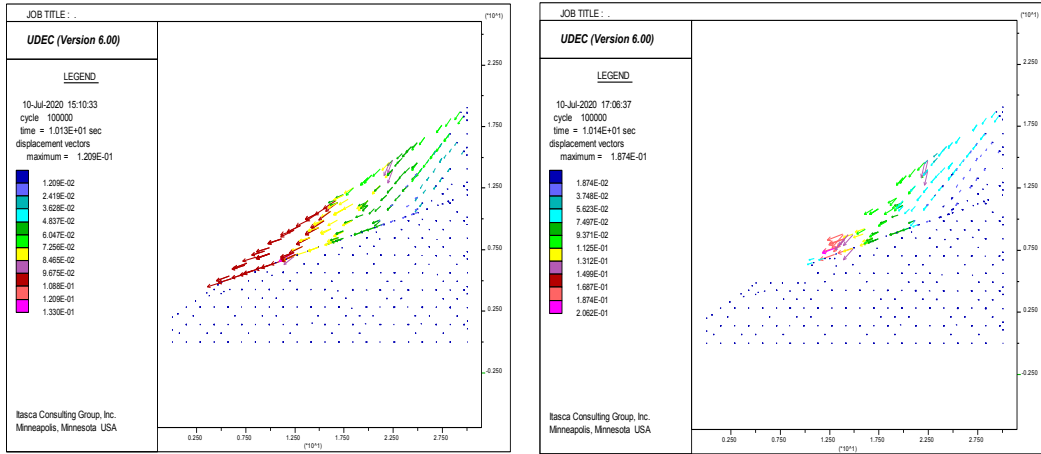


图 4 边仰坡开挖前后围岩位移矢量图

5 结论

本文对其古顶炭质泥岩隧道出口段边仰坡滑移破坏进行研究，研究结论如下：隧道边仰坡块体安全系数随着所处位置升高而增大；边仰坡块体安全系数越大，其抵抗滑移能力就越强，块体产生位移就越小；独立块体安全系数法可较为准确地分析隧道边仰坡稳定性。

参考文献

[1] 董永,张子新. 强度折减法进行公路隧道边仰坡稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2007(S1):1279-1283+1318.
 [2] 王树英,阳军生. 殿会坪连拱隧道边仰坡稳定性分析及整治[J]. 地下空间与工程学报,2007(S2):1496-1500.
 [3] 刘小兵. 隧道洞口边仰坡稳定性影响因素的综合性评价[J]. 铁道工程学报,2002(01):38-41.

[4] 张运良,陈富东,陈英烈,雷明锋. 隧道边仰坡滑塌处治及二次进洞施工技术实例研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(04):992-1000.
 [5] 曹亮宏,卢自立. 隧道洞口边仰坡稳定性分析[J]. 中外公路,2013,33(04):244-246.
 [6] 朱合华,李新星,蔡永昌,丁文其. 隧道施工中洞口边仰坡稳定性三维有限元分析[J]. 公路交通科技,2005(S1):119-122.
 [7] 卢海峰. 巴东组软岩边坡岩体工程特性及破坏机理研究[D]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2010.
 [8] 高峰,唐星,李星等. 基于 UDEC 离散元法的隧道塌方特征分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(01):24-28+34.
 [9] 沈华章,郭明伟,王水林等. 基于离散元的边坡矢量和稳定分析方法研究[J]. 岩土力学,2016,37(02):592-600.