

山区公路路堑边坡稳定性分析与评价

吴海清¹ 卢鑫月^{2*}

1. 滁州市公路管理服务中心, 2. 北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所

摘要: 山区道路路堑边坡在强降雨、地震活动、动荷载以及各种人为干预因素的影响下容易发生失稳破坏, 导致交通中断、和生命财产损失。本研究采用经典Bishop法和Plaxis 2D有限元分析程序对某山区道路工程的5个路堑边坡进行了稳定性分析和评价, 结果表明Bishop法和有限元法的边坡稳定性评价结果基本一致。不同边坡产状和岩石参数的边坡稳定性差异较大, 节理发育显著的千枚岩边坡的稳定系数较低, 有限元分析结果表明该边坡的剪应变、位移和塑性变形均较为显著, 因此该边坡发生滑坡的可能性较大。岩质边坡的坡脚附近区域表现出较大的塑性变形, 是岩质边坡的薄弱区域。

关键词: 路堑边坡; 边坡稳定性评价; Bishop法; 有限元分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.04.055

引言

由于地形地貌的影响, 山区公路建设往往需要大规模的开挖施工, 形成大量的路堑边坡。在地震和降雨等不利条件下, 路堑边坡容易发生崩塌、滑坡等地质灾害, 对工程建设进度和行车安全造成极大的影响。因此, 针对山区公路路堑边坡的稳定性分析与评价是十分必要的。边坡稳定性评价方法可分为定性分析方法^[1]、定量分析方法^[2]和数值模拟方法^[3]。定性分析是根据专家经验分析影响边坡稳定性的主要因素、可能出现的破坏形式及其失稳力学机制。该方法主要受到地质环境复杂和专家认知能力的限制。定量分析方法包括极限平衡分析方法^[4]和基于概率的非确定性分析方法^[5], 主要适用于简单均质岩质边坡的稳定性分析。极限平衡分析法模型简单, 方法简便易懂, 如Bishop法^[6]。非确定性分析方法包括可靠性分析方法和神经网络分析法等。近年来, 随着计算机技术的发展, 数值方法成为研究复杂边坡稳定性问题的有效手段。本文基于Bishop法和有限元方法分析和评价了重力作用下边坡的稳定性, 对5个路堑边坡进行了系统的安全分析和评估。

一、边坡稳定性分析方法

(一) 极限平衡法-Bishop法

采用Bishop法计算边坡的稳定系数, 边坡垂直条分带的受力计算简图如图1所示。AB为潜在圆弧滑面(半径为R)。滑体分成n个垂直条块, 第i条块体重为 W_i , 宽度为 b_i , 底面倾角为 α_i 。相邻水平条块之间的剪切力为 X_i 和 X_{i+1} , 条块底部法向作用力和剪力分别为 N_i 和 T_i ,

条块底部孔隙水压力为 u_i , 滑面的黏聚力和内摩擦角分别为 c_s 、 φ 。由Mohr-Coulomb准则及Terzaghi有效应力原理可得:

$$T_i = (N_i - u_i b_i \sec \alpha_i) \tan \varphi_i / F_s + c_s b_i \sec \alpha_i / F_s \quad (1)$$

根据条块竖向力的平衡条件得

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = W_i + X_{i+1} - X_i \quad (2)$$

结合式(1)和式(2), 可得

$$N_i = (W_i + X_{i+1} - X_i + u_i b_i \tan \alpha_i \tan \varphi_i / F_s - c_s b_i \tan \alpha_i / F_s) / \eta \quad (3)$$

$$T_i = [(W_i + X_{i+1} - X_i + u_i b_i) \tan \varphi_i / F_s - c_s b_i / F_s] / \eta \quad (4)$$

其中, $\eta = \cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi_i / F_s$

考虑荷载对圆心的力矩平衡, 有

$$\sum_{i=1}^n T_i R = \sum_{i=1}^n W_i R \sin \alpha_i \quad (5)$$

将式(3)和式(4)代入式(5), 可得

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n [(W_i + X_{i+1} - X_i - u_i b_i) \tan \varphi_i + c_s b_i] / \eta}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (6)$$

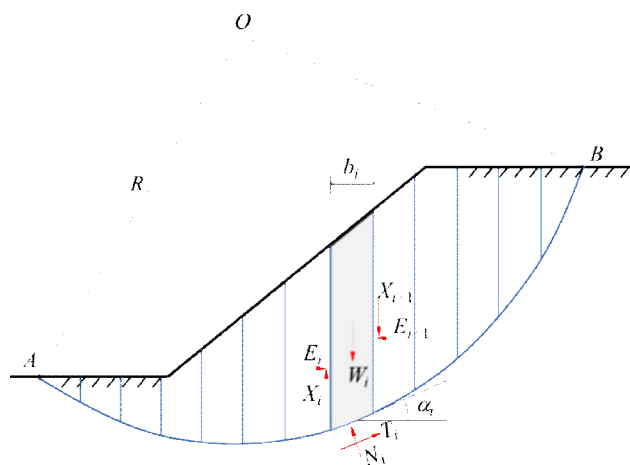


图1 Bishop法计算分析示意图

若进一步忽略条间剪力的作用, 则式(6)进一步简化为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n [(W_i - u_i b_i) \tan \varphi_i + c_s b_i] / \eta}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (7)$$

(二) 有限元分析方法

有限元法通用性强, 准确性高, 引入假设较少, 逐渐发展成为边坡稳定性分析的重要方法。在有限元模型中, 边坡破坏表现为岩土体承担的剪应力超过了其破坏

面上的抗剪强度，具有明确的物理意义；并且，利用有限元后处理程序得到的应力、应变或位移云图，便于直观地理解边坡破坏面的形成机制。岩体的破坏判别标准采用Mohr-Coulomb破坏准则，假定岩体为弹性材料，将所有节点产生的法向应力和剪应力与Mohr-Coulomb破坏准则进行比较，岩体的弹性极限为Mohr-Coulomb破坏包络线，超过Mohr-Coulomb破坏包络线，则认为节点产生塑性变形。当模型中足够数量的节点发生塑性变形，认为边坡发生全局剪切破坏。

二、路堑边坡稳定性分析

表1 不同边坡的参数

边坡编号	岩石类型	切坡高度 (m)	边坡角度 (°)	重度 (kN/m ³)	黏聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	拉伸强度 (kPa)
L1	变闪长岩	20	65	28.9	90	30	2.0
L2	石英岩1	18	75	26.3	80	33	3.0
L3	千枚岩	15	70	27.4	46	24	5.0
L4	石英岩2	25	80	25.9	132	37	6.0
L5	变质火山岩	30	65	28.3	184	38	8.0

(一) 极限平衡分析

利用二维Slide v. 6软件和简化Bishop法计算5个边坡的安全系数 F_s ，得到如图2所示的边坡安全系数等高线。边坡L1和L2的最小 F_s 值分别为1.55和1.44，表明这两个边坡是基本稳定的。如图2所示，边坡L1的滑面位于坡脚，即坡脚处可能发生失稳破坏。边坡L2的滑面距离坡脚远离坡脚，即滑坡体可能从边坡中上部落下。边

根据岩性、节理和边坡几何形状的变化，选择了某工程五个边坡脆弱位置（编号为L1~L5）进行稳定性评估。工程现场勘查发现，所选边坡的岩石变形显著且节理发育。例如，边坡L3千枚岩节理间隔紧密，且出现多个正交的裂隙，导致岩体断裂破碎。由于施工过程对边坡岩层的扰动以及重型车辆交通引起的振动，降低了岩石裂隙的摩擦强度，叠加施工期间强降雨显著增大了孔隙水压力，导致岩体强度降低，路堑边坡多次出现不同规模的失稳破坏。利用室内试验，对各边坡的岩样进行了力学参数测试，边坡的产状参数和岩石属性见表1。

坡L3的最小 F_s 为1.06，表明边坡处于临界状态，容易发生滑坡灾害，滑面可能位于坡脚附近，该计算结果与现场观测结果基本一致。边坡L4的最小 F_s 为1.48，表明该边坡是相对稳定的，由于该边坡坡高且陡，岩石较为坚固，需要注意的是开挖过程中坡度不可超过临界斜率。L4的潜在滑面位于坡脚附近。边坡L5的最小 F_s 为2.05，表明边坡状态十分稳定。

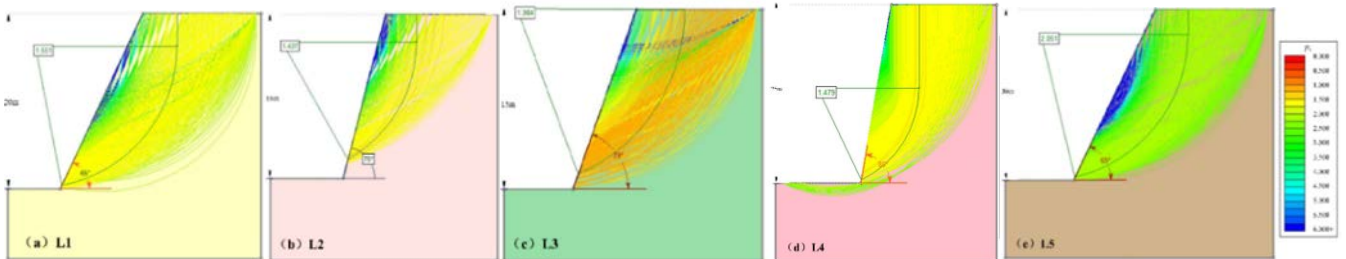


图2 边坡安全系数等高线及最小安全系数

(二) 二维有限元分析

通过有限元程序Plaxis 2D建立5个岩质路堑边坡的有限元模型，采用6节点三角形单元离散岩体。在重力荷载作用下，开展了5个不同位置（L1-L5）的路堑边坡的稳定性分析。

图3所示为5个边坡上所有节点的剪应变场和潜在破坏面（表示为粗白线），图4所示为边坡L2-L4岩体中Mohr-Coulomb塑性点和受拉断裂点。从图3和图4可以看出，边坡L1的最大剪应变为 93.47×10^{-3} ，远小于极限剪应变1.6%，坡脚的最大位移仅1.23mm，表明该边坡是较为稳定的。根据剪应变云图，在坡脚上方可以发现该边坡靠近坡脚的滑面存在明显的弱化区。边坡L2坡脚附近的最大剪应变达到 234.28×10^{-3} ，但坡顶剪应变较小，因

此该边坡也较为稳定。潜在破坏面AB两侧岩体的相对位移较大，达到3.1mm。由于塑性变形集中，边坡下部部分岩体可能会被剥离（图4a）。边坡L3千枚岩的稳定性最差，最大剪应变为约为3%，滑坡体整体位移较大，坡顶出现张拉裂缝，这是十分危险的。由图4b可以看出，大部分单元的塑性变形超出限值，形成了明显的薄弱区。边坡L4的稳定系数较高，单元最大位移为2.38mm。但从图4c可以看出，较大区域内的单元发生受拉断裂或超过Mohr-Coulomb破坏包络线，表明该区域的边坡可能处于高应力状态（高陡边坡）。一旦发生降雨、岩体解体、应力不连续性或地震等不利因素，导致岩体的强度降低，很有可能引起巨大的滑坡，应予以高度重视。边坡L5较为稳定，坡体的剪应变和位移都很小。

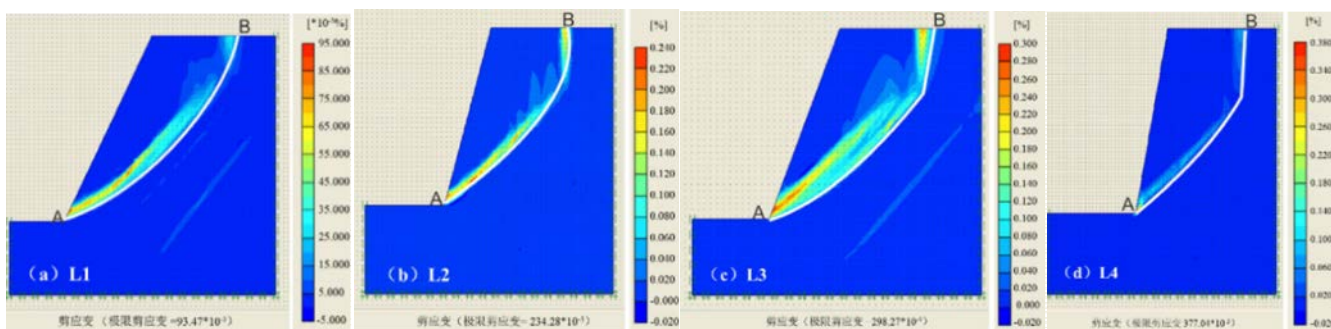


图3 不同位置路堑边坡的剪应变场及潜在破坏面

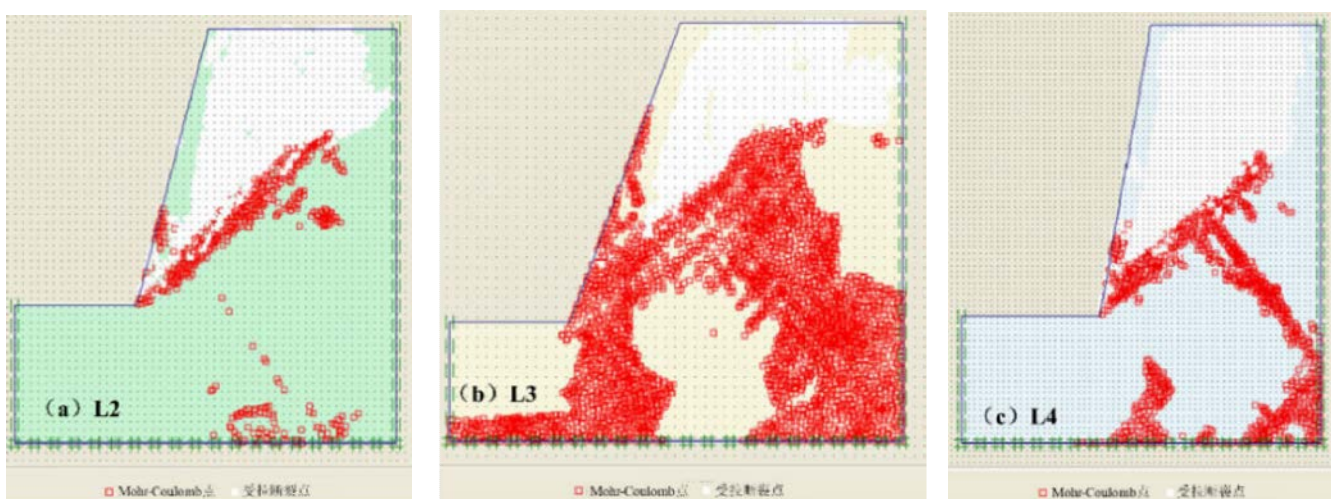


图4 岩体中Mohr - Coulomb塑性点和受拉断裂点

通过以上分析可知，使用极限平衡法和有限元分析方法得到的结果相似。由 F_s 值可知，边坡L3处发生滑坡的可能性较大，L1、L2、L4三个边坡的状态介于临界稳定到稳定之间，边坡L5非常稳定。为了避免岩崩和滑坡风险，需要根据岩体的破裂模式，制定相应的控制措施。多数岩质边坡在坡脚或坡脚附近显示出较大的塑性变形区（L1、L2、L5），坡脚附近是边坡的薄弱区域，可能削弱边坡的稳定性。L3边坡的顶部出现张拉裂缝，对边坡的稳定性影响十分显著。根据现场工程条件和边坡稳定性分析结果，考虑到L3边坡岩体节理程度较高，采用全注浆岩石锚杆及钢丝网加固以防止边坡失稳，取得了较好的效果。

三、结论

本文基于极限平衡法（Bishop法）和有限元方法计算分析5个路堑边坡的稳定性，两种方法得到的边坡稳定性分析结果基本一致。节理发育显著的千枚岩边坡L3的稳定性较差，坡体的剪应变和位移均较大，且坡顶出现张拉裂缝，大部分单元的塑性变形超出限值，采用全注浆岩石锚杆及钢丝网加固可有效防止边坡失稳。其余边坡的稳定性均满足要求，坡脚附近区域表现出较大的塑性变形，是岩质边坡的薄弱区域，可能会削弱边坡的

稳定性。

参考文献

- [1] 刘斌, 薛伟, 徐鹏. 西南山区某公路路堑边坡稳定性分析与评价[J]. 山西建筑, 2015 (30): 135-136.
 - [2] 罗文斌, 丁舸, 阎文. 高陡路堑边坡稳定性评价及地质灾害防治对策[J]. 公路工程, 2017, 42 (5): 278-282.
 - [3] 王开源. 山区公路岩石高路堑边坡稳定性评价[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
 - [4] 张天文, 才庆祥, 李鹏越, 等. 极限平衡与有限元法用于边坡稳定性分析的对比[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45 (7): 46-48.
 - [5] 刘继伟. 山区营运高速公路岩质路堑边坡稳定性风险评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
 - [6] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique, 1955, 5 (1): 7-17.
- 作者简介: 吴海清, 男, 1964年生, 安徽滁州, 汉族, 大专, 高级工程师, 主要从事道路桥梁施工及工程病害防治方面的研究。