

含软弱夹层顺层陡坡失稳机制及治理措施分析

陈新国, 章吟秋

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘 要: 含软弱夹层的顺层陡坡岩质边坡的失稳机制分析及治理是公路工程中的难点问题, 针对某高速公路中岩质路堑边坡滑坡, 采用有限元方法对边坡滑坡的过程进行反演、基于强度折减理论对该滑坡的治理措施及稳定性进行了分析。结果表明: 边坡开挖产生的陡坡率引起卸荷拉张裂隙发育, 进而导致前缘岩体崩塌是滑坡诱发阶段, 后缘岩体沿顺层软弱夹层滑动是滑坡的发展阶段; 滑坡治理设计的卸载、坡脚锚固及前缘反压等措施有效, 可为类似含软弱夹层的顺层陡坡率滑坡治理提供参考。

关键词: 软弱夹层; 顺层; 陡坡率边坡; 有限元

中图分类号: U416.1+63

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)10-0159-03

0 引言

随着我国基建工程的不断推进, 高速公路建设过程中所面临的地质条件越来越复杂。其中, 软弱夹层是较为常见的一种地质构造。当软弱夹层与边坡走向一致时, 该边坡可以看作是顺层边坡。与普通边坡不同, 顺层边坡的稳定性较差, 常常会发生边坡沿着软弱夹层崩塌、滑落的现象, 具有危害大、波及广等特点^[1-2]。

顺层边坡的稳定性及治理一直是工程上的一大难题, 许多学者针对这一问题进行了研究。何武等^[3]针对顺层边坡进行了二维和三维有限元的分析, 提出了两种临界破坏范围的确定方法; 杨成等^[4]通过数值模拟对多层软弱夹层的顺层边坡的变形过程、破坏范围等进行了分析; 冯君等^[5]利用地质力学模型试验对陡倾状的顺层边坡进行了分析, 给出了边坡走向与岩层走向夹角的上限值。这些研究主要集中在软弱夹层和边坡倾角之间的关系, 选取的边坡倾角一般较小, 大多不超过 45°, 而对于施工过程中可能出现的陡坡率甚至于垂直开挖的边坡研究较少。

为了研究含软弱夹层的陡坡率顺层边坡的破坏机理, 本文以某高速公路建设中废弃采石场区内顺层岩质滑坡为实例, 采用有限元软件对滑坡的动态演化过程进行分析, 运用强度折减理论计算加固后边坡的整体稳定性, 为今后类似滑坡的治理提供参考。

收稿日期: 2021-05-08

作者简介: 陈新国(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事路基路面设计工作。

1 工程概况

浙江省三门湾大桥及接线高速公路 K97+573 ~ K97+681 段右侧路堑边坡穿过陡坡丘陵区, 区域内分布零乱采坑, 部分采坑中积水。2018 年 10 月该段路堑区施工开挖, 施工过程中对岩质边坡近乎垂直开挖, 右侧边坡开挖后坡脚处揭露出软弱夹层, 随后出现边坡整体滑塌现象。

1.1 路堑区地质概况

路堑区侏罗系上统西山头组(J3x)中风化基岩直接裸露, 上部岩性为块状含晶屑熔结凝灰岩, 下部为层状沉凝灰岩。主要发育两组节理: (1)80°∠85°, (2)315°∠75°, 节理延伸长, 波状起伏, 有错动迹象及泥化薄膜。

开挖过程中揭露的软弱夹层岩性为沉凝灰岩, 中~薄层状, 层面为波状, 有起伏, 总体倾向东, 倾角缓, 约 5~10°, 厚度 5~12 cm, 层间可见挤压, 有绿泥石化蚀变, 遇水易软化。

1.2 滑坡概况

滑坡平面形态呈近圆弧状, 滑坡体前缘及后缘高程约 20 m; 滑坡体长约 108 m, 中部宽约 28.9 m, 面积约 1 803 m², 体积约 110 068 m³, 滑坡形态如下图 1(a)所示。

如图 2 所示, 边坡滑移前坡体近垂直开挖形成陡坡率坡面, 滑塌时坡体前缘首先出现大面积土石崩落现象, 随后滑塌体沿软弱夹层整体向前推移, 出现明显滑动的岩体平均厚度约 20 m, 滑塌范围以外坡顶存在多处裂缝, 裂缝距离滑塌体后缘约 8 m, 如图 1(b)所示。

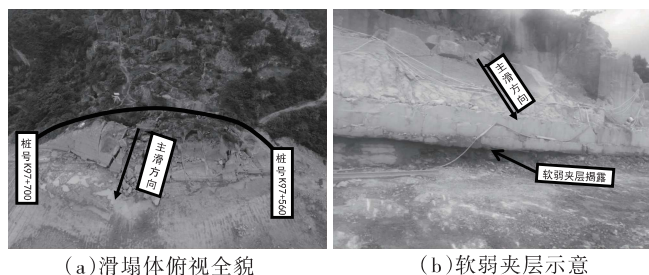


图1 滑塌体现状



图2 滑塌过程实拍

2 边坡稳定性分析

结合现场施工情况与地质条件分析,该路段施工过程中对岩质边坡近垂直开挖,坡顶沿原有的节理裂隙产生卸荷拉张裂隙,随着裂隙不断发育扩大,与下伏软弱夹层贯通,坡顶采坑区积水沿裂隙渗入下部软弱夹层,导致软弱夹层软化并产生孔隙水压力;同时因坡脚应力集中使软弱夹层受挤压破坏,最终导致边坡整体垮塌。

3 有限元数值模拟

3.1 计算方法

基于强度折减理论的安全系数定义为^[6]:假定结构处于临界平衡状态时的稳定安全系数为 K ,则此时材料的临界强度参数黏聚力 c' 和内摩擦角 ϕ' 取值与材料本身的 c 和 ϕ 之间可以用公式(1)和公式(2)表示:

$$c' = \frac{c}{K} \quad (1)$$

$$\tan\phi' = \frac{\tan\phi}{K} \quad (2)$$

式中: K 为稳定安全系数即为强度折减系数; c 为材料的黏聚力,kPa; ϕ 为材料的内摩擦角, $^{\circ}$; c' 为材料的临界黏聚力,kPa; ϕ' 为材料的临界内摩擦角, $^{\circ}$ 。

边坡稳定性分析采用收敛性判据,即以计算过程中迭代是否收敛为依据。

3.2 有限元模型建立

根据 K97+642 断面实测开挖坡面形状与软弱夹层的走向,建立边坡临界稳定模型。数值模型底部固定,左侧法向约束,右侧采用自由边界。岩体采用摩尔-库伦屈服准则,通过反算的方法确定土体的抗

剪强度指标,从而得到安全系数 $F=1.0$ 时对应的临界稳定模型,具体计算参数见表1。

表1 数值模拟参数(临界状态)

土体类型	弹性模量/MPa	泊松比	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(^{\circ})$
岩石	60	0.1	23	60	45
软弱夹层	20	0.2	23	8	10

3.3 边坡滑塌过程反演

本文对滑坡的实测数据和数值模拟结果进行比较和分析,对滑坡的发展过程进行反演。

本文建立的模型在达到临界稳定状态时的滑裂面如图3所示,滑裂面为直线型,滑坡滑移剪出点在坡脚的位置,滑裂面的终点距离滑坡前缘约14.6 m。为了进一步对滑坡发展过程进行反演,在上述模型的基础上对部分土体进行卸载,并计算边坡稳定性。结合滑坡实际情况,确定卸载的土体范围为三角形,剖面边长分别为9.4 m和17.8 m,计算得到卸载后边坡稳定安全系数为1.145,坡体的潜在滑裂面为折线型,如图4所示。

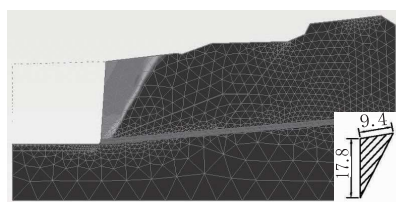


图3 初始边坡滑裂面模拟

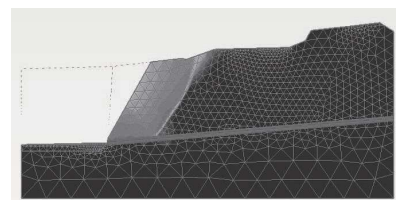


图4 卸载后滑裂面模拟

通过对两次计算结果对比可知,陡坡率顺层边坡的破坏可以分为两个阶段:

(1)诱发阶段:由于边坡开挖产生陡坡率,在自身重力及孔隙水压力的联合作用下,边坡发生失稳,该阶段与普通陡坡率边坡的破坏机制相同,都是由于抗力小于荷载,安全系数小于1,进而产生的破坏;

(2)发展阶段:由于上一阶段的产生,边坡内部结构发生破坏,同时,第一阶段边坡的失稳还会产生动力作用,引起软弱夹层的破坏,进而引起整个边坡的失稳。

因此,通过数值计算结果可以看出,软弱夹层并不是原边坡第一次滑塌的控制因素,边坡部分坡体滑塌是因为垂直开挖的施工工艺导致的,但是首次滑塌所引起震动以及应力释放可能是后续滑坡整体

滑移的诱因之一。通过部分土体的滑坡和卸载后,边坡开始沿软弱夹层滑移,与实际边坡后续的滑塌情况相符合。

将计算得到的滑裂面与实测数据相比较,如图 5 所示。实测得到本次滑坡该断面滑塌体厚约 17.9 m,滑塌后坡体仍存在裂缝,裂缝距离滑塌体后缘约 10 m 左右。本次模拟得到的潜在裂缝 D 位置如图 3 所示,位于 B-C 之间,距离滑坡体后缘约 8 m,距离后方裂缝约 2 m。这可能是因为原岩体存在多处裂隙,滑坡实际发展的过程中滑塌体仅部分滑落时,其引起的震动以及应力释放诱发了坡顶原有节理裂隙的扩展,与下部软弱夹层贯通,形成了实际滑面。

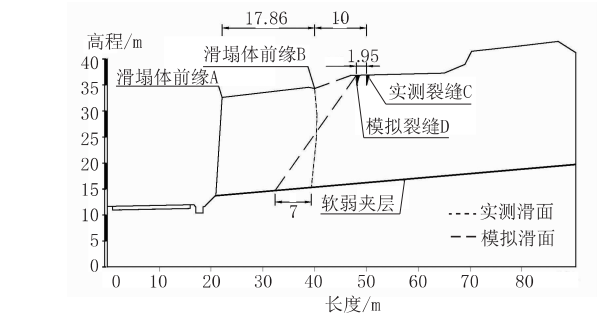


图 5 模拟结果对实测数据对比(单位:m)

数值模拟的结果和实际相比虽然存在一定的误差,但考虑到实际地质情况的复杂性,本文所建立的临界稳定模型整体较为合理,能对滑坡的发展作出较为准确的预测。

4.4 治理后边坡稳定性分析

边坡主要采用削坡卸载,坡脚锚固梁加固结合前缘反压等多种方法对滑坡进行治理。本文临界稳定模型的基础上,对治理后边坡稳定性进行数值模拟。

首先采用削坡卸载的方式清理滑塌体,卸载后边坡坡率为 1 : 0.75,考虑到此时坡体内最不利位置处于坡脚处,设计对坡脚采用锚固梁进行加固,其中锚杆加固方向与坡面垂直,杆长 6 m,纵向间距 2 m,每根锚杆施加 180 kN 的预应力,其他具体参数见表 2。

表 2 数值模拟参数(治理后边坡)

结构物	弹性模量 /MPa	泊松比	γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	间距 /m	预应力 /kN	EA/kN
锚杆	—	—	—	2	10	160 800
锚固梁	30 000	0.2	26	—	—	—

通过数值模拟得到边坡加固后整体位移分布如图 6 所示,此时坡脚的位移值最大,达到 14 cm,对应的边坡整体安全系数为 1.4。满足规范稳定性要求。

基于高速公路建设中景观要求的考虑,设计采用土石混合料对坡体前缘进行反压,对反压后的边坡进行数值分析,坡体内位移分布如图 7 所示,计算

得到边坡整体的安全系数为 1.727。经计算发现,增加前缘反压的设计,坡脚处的位移值由 14 cm 减少到 12 cm,安全系数从 1.40 提升至 1.727,安全系数提高了 23.3%。

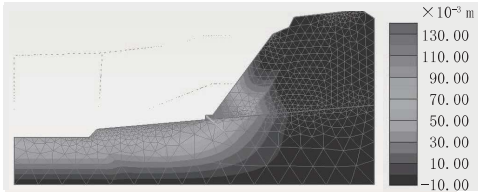


图 6 锚固梁加固位移分布(单位:m)

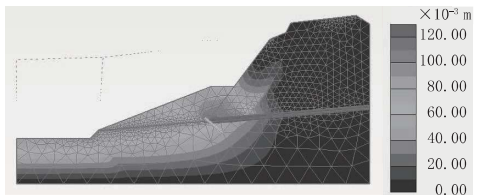


图 7 前缘反压位移分布(单位:m)

5 结 语

本文以含软弱夹层的陡坡率顺层岩质滑坡为实例,采用有限元软件对滑坡的动态演化过程和治理前后的整体稳定性进行分析,得出以下结论:

(1)边坡开挖产生的陡坡率引起卸荷拉张裂隙发展引起的前缘岩体崩塌是滑坡诱发阶段,后缘岩体沿顺层软弱夹层滑动是滑坡的发展阶段。

(2)结合数值模拟分析采用后缘卸载、坡脚锚固梁加固以及前缘反压等加固措施之后,滑坡的稳定性大幅提高,整体稳定安全系数达到 1.727。结合治理边坡运营阶段良好的表现可知以上滑坡治理措施安全有效,因此采用数值模拟分析岩体稳定性的方法可行。

(3)公路工程若无法避让地形地貌改造强烈的山区地段,应尽量放缓边坡开挖坡率并注意地表积水对岩体裂隙发育的影响,否则若岩体卸荷裂隙发育并与软弱夹层贯通后,可能诱发大范围边坡滑塌,使治理难度和处治费用大幅提高。

参考文献:

[1] 黄润秋,许强.中国典型灾难性滑坡[M].北京:科学出版社,2008.
[2] 陈静曦,章光,袁从华.顺层滑移路堑边坡的分析和治理[J].岩石力学与工程学报,2002,21(1):48-51.
[3] 何武,张圣亮,冯君,向波,王铎.含软弱夹层顺层边坡临界破坏范围分析[J].四川建筑科学研究,2021,47(2):63-69.
[4] 杨成,谯乾峰,雷松.顺层岩质边坡失稳破坏临界长度的数值模拟分析[J].西北地质,2019,214(4):254-266.
[5] 冯君,周德培,李安洪.顺层岩质边坡开挖松弛区试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005(5):840-845.
[6] 陈祖煜.岩质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2005.