

基于离散元的顺层岩质边坡加固及稳定性分析

陈少轩,余臣相,杜勤

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北 武汉 430010)

摘要:为研究顺层岩质边坡加固机理及稳定性问题,基于离散元方法,利用FLAC 3D软件建立二维模型,对岩体参数敏感性进行了分析,同时得出抗滑桩加固机理。主要得到以下结论:岩层倾角、坡角、内摩擦角和黏聚力对顺层岩质边坡稳定性影响显著,边坡安全系数对坡角和内摩擦角的改变更为敏感;内摩擦角以及黏聚力的增大会导致边坡抗剪强度增大,使抗滑力大于下滑力,进而使顺层岩质边坡安全系数增大;通过研究抗滑桩的布设以及桩间距,发现桩间距为 $2D\sim 3.5D$ 时,桩位5号时为最优布设位。

关键词:顺层岩质边坡;离散元;敏感性;抗滑桩

中图分类号: U417.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0234-04

0 引言

随着“十四五规划”以及“一带一路”战略的实施,西部城市迎来大发展。西部城市地质条件复杂,在建桥修路等人为因素与自然因素的共同影响下区域地质灾害频繁发生,给我国造成巨大的经济损失,甚至危害人民群众生命安全。岩质边坡破坏性大、变形小、边坡失稳随机性强,因此岩质边坡失稳性问题尤为严峻。而顺层岩质边坡广泛分布于西南山区,危害性极大,因此研究顺层岩质边坡稳定性问题以及加固机理迫在眉睫。

近年来,国内外研究学者对顺层岩质边坡稳定性问题开展了大量的研究。Guo^[1]等通过数值模拟与室内物理试验相结合的方式,研究了顺层岩质边坡稳定性变化规律。在此基础上,Liu^[2]基于极限平衡法以及结构优化法,进一步提出LEM-BESO边坡稳定性的分析方法。车铁成^[3]基于UDEC离散元软件对山区顺层边坡的稳定性进行研究,发现荷载作用下,岩质边坡整体沿着层理面滑移,滑裂面呈直线型且最危滑裂面位于坡脚处。李剑伟^[4]以宜宾志诚港港区大道顺层岩质边坡为例,结合室外调查和室内试验,对边坡稳定性进行了分析,结果表明:边坡在坡脚开挖、降雨和自重应力等因素作用下发生失稳破坏,采用抗滑支挡措施处理后,边坡稳定性明显提高。吴朋宇^[5]通过建立三维受压板模型,研究了多因素作用下

顺层岩质边坡破坏机理,同时推导出边坡溃屈变形破坏的临界方程以及失稳判定方法。谭明健^[6]等从多角度对顺层软硬互层岩质边坡进行了研究,结果表明:顺层岩质边坡更易发生沿软弱夹层的滑动,当边坡软弱结构面较多时,容易沿节理贯通面进行破坏。以上为岩质边坡破坏机理分析,而部分学者对边坡支护展开了研究,冯炜^[7]基于极限平衡法对狮子山边坡稳定性分析,采用抗滑桩对其支护,有效的防治边坡失稳。钟皓^[8]基于FLAC 3D数值模拟软件分析了复合筋锚杆支护边坡工程的稳定性问题,发现了锚杆作用下表层土体得到加固,且主要滑动面消失。

前人研究主要集中于顺层岩质边坡稳定性与支护工程方面^[9-11],较少涉及对岩体参数敏感性的研究,因此本文基于前人研究基础上,考虑岩体参数变化对边坡稳定性的影响,同时研究了抗滑桩加固机理与防护效果,该研究为治理顺层岩质边坡失稳问题提供参考。

1 工程概况

研究区以某实际顺层岩质边坡为例,地势西南高东北低,高度在919~1 876 m之间,年平均降雨量为566.4 mm,降雨主要集中在6~9月,占比可达全年降雨量的65.3%,年最高气温达36.5℃,最低气温-13℃,区内主要分布有风化灰页岩以及风化泥灰岩,岩层产状为近东西走向,岩层倾角约为35°,坡角为38°。由于该区域存在地表常年性支流,地表水系较为丰富,雨水充足,因此要注意排水沟设计,同时通过查

收稿日期:2023-03-06

作者简介:陈少轩(1997—),男,硕士,助理工程师,从事道路设计工作。

阅《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015),该地区新构造作用强烈,断裂活动频繁,其地震动峰值加速 0.15g,地震基本烈度为 VII 度。

2 顺层岩质边坡二维模型建立

2.1 FLAC 3D 简介

FLAC 3D 是 ITASCA 公司旗下的一款块体离散元软件,可用于非连续介质在动静荷载作用下时力学响应特征,基于此 FLAC 3D 能更为真实的模拟层状岩质边坡的破坏特征以及相应变形规律问题。FLAC 3D 离散元软件中的本构模型:弹性模型、Drucker Prager 塑性模型、M-C 塑性模型、应变软化/硬化模型、双线性塑性模型、M-C 模型等。

2.2 模型的建立

(1)本构关系

本模型根据实际工程情况,选用摩尔-库伦模型。

(2)参数标定

数值模拟的正确性取决于细观参数的确定,室内力学试验直接获得了宏观力学参数,包括抗压强度、内摩擦角、黏聚力等。而 FLAC 3D 的数值模拟软件并未给出细观力学参数与宏观力学参数之间的定量关系表达式,因此本文基于实际勘察资料以及相关规范对岩体细观参数进行标定,岩体参数标定结果见表 1。

表 1 岩石细观力学参数						
材料	弹模 / GPa	容重 / (kN·m ⁻³)	泊松比	摩擦角 /(°)	黏聚力 / kPa	抗拉强度 / kPa
强风化 泥灰岩	1.34	24.98	0.22	30	52	54
微风化 泥灰岩	1.66	28.5	0.22	33	100	104
微风化 灰页岩	1.223	27.13	0.25	25	153	186
层理面	—	—	—	20	8	10

(3)二维模型建立

图 1 为数值模拟模型,考虑现实的计算条件,将模型分数块。该模型全长约为 123.56 m,最大高度 100 m,坡高 44.24 m,宽 30 m,以模型整体倾角为 45°,岩层倾角 30°为例,采用改变坡角与总高度的方式,研究坡角与倾角对边坡稳定性的影响,本模型共计 13 245 个单元,13 543 个节点。

3 岩体参数敏感性分析

岩体参数的改变对顺层岩质边坡稳定性影响显著,本节通过改变岩层倾角、坡角、内摩擦角和黏聚

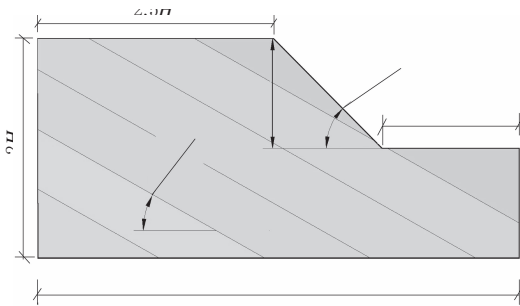


图 1 顺层岩质边坡模型

力探究顺层岩质边坡稳定性变化。

3.1 岩层倾角及坡角

坡角及岩层倾角是影响顺层岩质边坡稳定性的主要因素之一,坡角与倾角均属于内在因素,因此采用全因素分析法,对坡角与倾角进行组合,研究坡角和倾角对顺层岩质边坡稳定性影响。图 2 为不同倾角下边坡安全系数变化曲线。

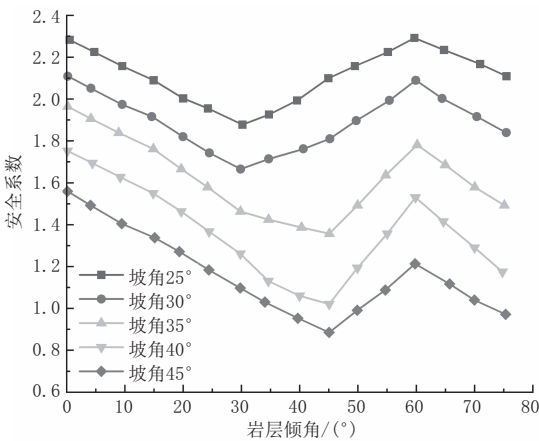


图 2 不同坡角下边坡安全系数与倾角关系曲线

由图 2 可知,当坡角恒定时,安全系数随着岩层倾角的增大,出现先减小后增大的变化趋势,当坡角处于 25°~30°,岩层倾角 30°时安全系数出现最小值,分别为 1.92、1.78;当坡角处于 35°~45°,岩层倾角 45°时安全系数出现最小值,分别为 1.42、1.02、0.88;无论坡角为何值,岩层倾角 60°时,安全系数出现最大值,由此可知,安全系数与倾角之间并不是简单的线性关系,倾角与坡角也存在一定关系。

当岩层倾角恒定时,随着坡角的增大,安全系数在不断减小,坡角变化时的安全系数相较于倾角变化时的安全系数下降幅度更大,由此推测坡角变化对顺层岩质边坡稳定性影响更大,敏感性更高。

3.2 黏聚力

以边坡处于最不利情况时为例,此时边坡坡角为 45°,岩层倾角为 45°。研究黏聚力的变化对顺层岩质边坡稳定性的影响,由于边坡为层状岩体,黏聚力具有显著差异,因此确定原岩黏聚力,讨论不同倍

数下黏聚力对安全系数的影响。图3为不同黏聚力下边坡安全系数变化曲线。

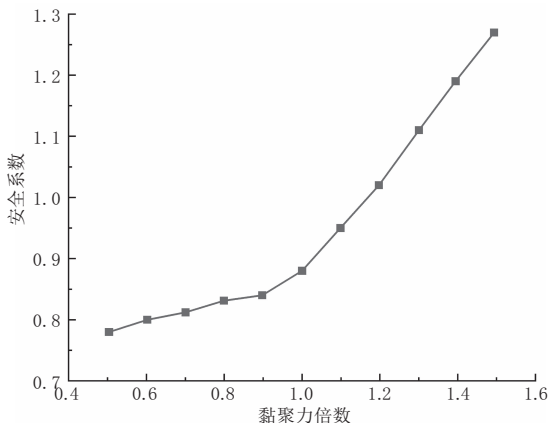


图3 不同黏聚力下边坡安全系数变化曲线

由图3可知随着黏聚力的增大,岩质边坡安全系数也在不断增大,当黏聚力从原岩0.5倍扩大至1.5倍时,边坡安全系数从0.789增大至1.293。黏聚力的增大会导致边坡抗剪强度增大,使抗滑力大于下滑力,进而使岩质顺层边坡安全系数增大。

3.3 内摩擦角

以边坡处于最不利情况时为例,此时边坡坡角为 45° ,岩层倾角为 45° 。研究内摩擦角的变化对顺层岩质边坡稳定性的影响,由于边坡为层状岩体,内摩擦角具有显著差异,因此确定原岩内摩擦角,讨论不同倍数下内摩擦角对安全系数的影响。图4为不同内摩擦角下边坡安全系数变化曲线。

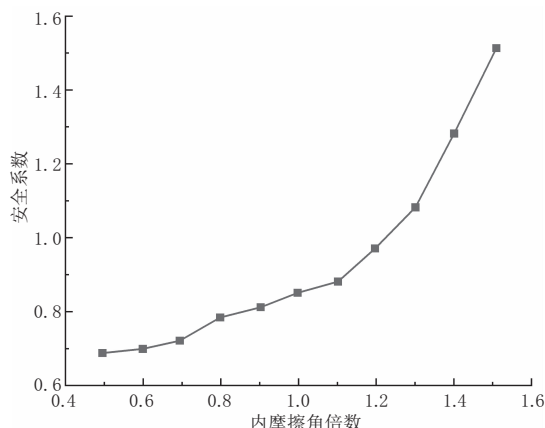


图4 不同内摩擦角下边坡安全系数变化曲线

由图4可知随着内摩擦角的增大,岩质边坡安全系数也在不断增大,当内摩擦角从原岩0.5倍扩大至1.5倍时,边坡安全系数从0.671增大至1.53。内摩擦角的增大会导致边坡抗剪强度增大,使抗滑力大于下滑力,进而使岩质顺层边坡安全系数增大。同时通过对比不同内摩擦角和黏聚力对安全系数的影响,由此推测内摩擦角变化对顺层岩质边坡稳定性

影响更大,敏感性更高。

表2为不同内摩擦角下边坡最大水平位移。

内摩擦角倍数	位移/mm
0.5	3 553.89
0.6	1 867.31
0.7	987.45
0.8	658.31
0.9	457.56
1.0	428.79
1.1	232.43
1.2	200.76
1.3	14.32
1.4	4.36
1.5	3.71

由表2可知,内摩擦角倍数在0.5~1.2之间时,边坡水平位移极大,同时由图4可知当内摩擦角倍数在0.5~1.2之间时,边坡安全系数小于1,由此可知此时边坡已经破坏。

4 抗滑桩加固机理研究

为研究抗滑桩加固机理,以边坡坡角为 40° ,岩层倾角为 35° 时为例,采用抗滑桩支护方式,抗滑桩桩长为10 m,桩身尺寸为b为1.5 m,h为2 m,抗滑桩布设点位对岩质边坡稳定性影响显著,因此为满足工程需要,需确定抗滑桩布设最优位置,图5为抗滑桩布设位置示意图,抗滑桩布设为1~11号。

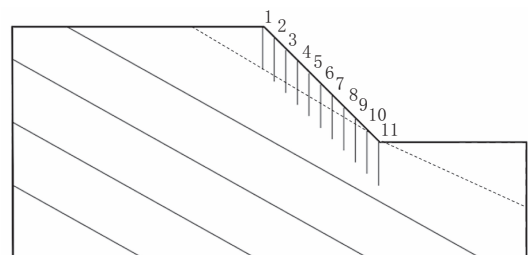


图5 抗滑桩布设位置示意图

4.1 边坡位移分析

图6、图7为不同桩位对应的边坡安全系数以及最大水平位移。

由图2可知,未防护之前,边坡安全系数为1.11,由图可知,防护后7号桩位为安全系数最大点位,安全系数为1.412,而1、2、3、4、10、11号桩位安全系数以及最大水平位移与未防护前相差不大,抗滑桩未起到良好的防护作用。同时随着桩位的变化岩质边坡先增大后减小,而最大水平位移呈缓慢上升趋势。结合图6、图7,5号桩安全系数相对较大,位移相对小,因此综合考虑5号桩位为最优布设位。

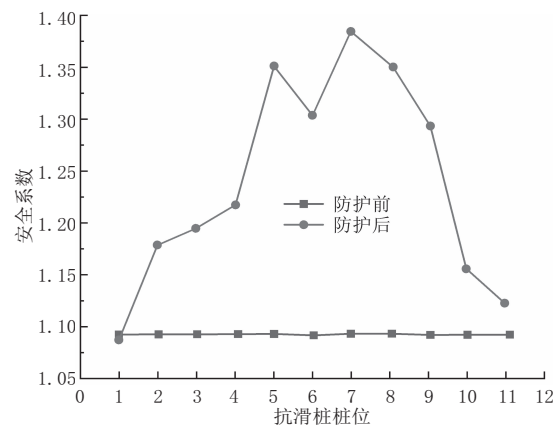


图6 不同桩位边坡安全系数

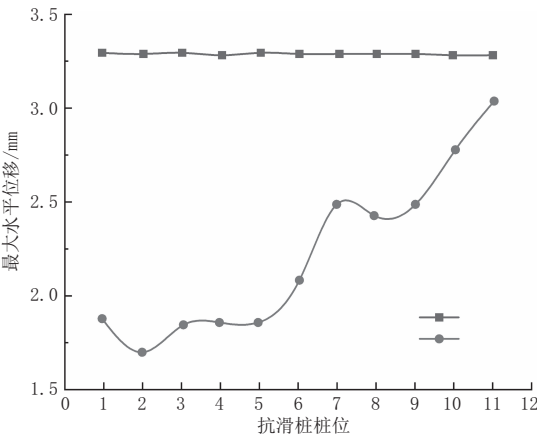


图7 不同桩位边坡最大水平位移(单位:mm)

4.2 桩间距分析

取桩间距为 D ,研究不同倍数桩间距下,岩质边坡应力及稳定性变化趋势。图8、图9为不同桩间距下 X 和 Y 方向应力变化曲线。

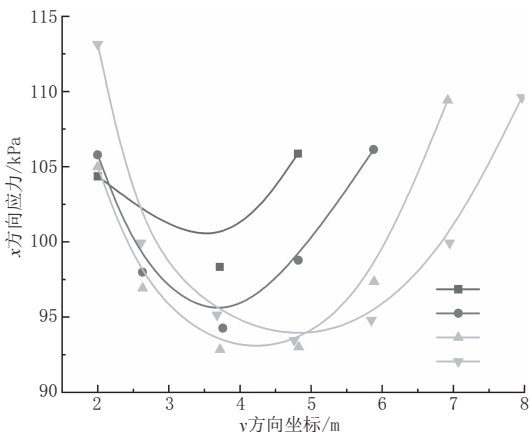


图8 不同桩间距下 X 方向应力变化曲线(单位:MPa)

由图8、图9可知,不同桩间距下 X 、 Y 应力变化趋势基本一致,但应力的极值各不相同。

图10为不同桩间距下顺层岩质边坡的安全系数变化曲线,由图可知桩间距为 $2D \sim 3.5D$ 时,边坡的安全系数较未防护前提高较多,而其他桩间距下安全系数提升效果不显著,因此桩间距的选定对边坡稳定性影响显著。

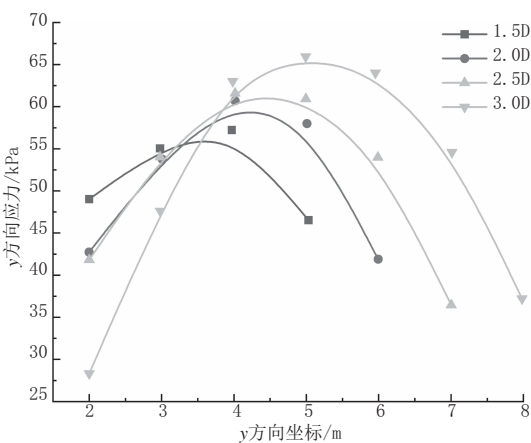


图9 不同桩间距下 Y 方向应力变化曲线(单位:MPa)

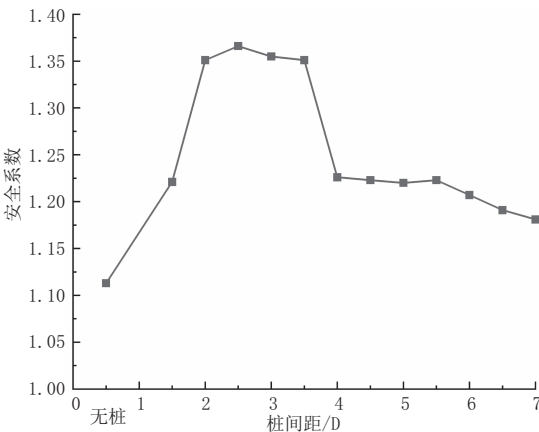


图10 不同桩间距下边坡安全系数

5 结 语

本文基于离散元的方法,利用FLAC 3D软件建立二维数值模型,研究了顺层岩质边坡抗滑桩加固机理及岩体参数敏感性,主要结论如下:

- (1)岩层倾角、坡角、内摩擦角和黏聚力的变化会导致顺层岩质边坡稳定性变化。
- (2)黏聚力和内摩擦角的增大,有利于边坡稳定性,这是由于黏聚力和内摩擦角的增大会使坡体抗剪强度增大,进而抗滑力增大。
- (3)桩位的布置以及桩间距对边坡稳定性影响较大,当桩间距为 $2D \sim 3.5D$ 时,边坡的安全系数明显提高。

参考文献:

[1] G-L Guo,Zha J-F,Miao X-X,et al.Similar material and numerical simulation of strata movementlaws with long wall fully mechanized gangue backfilling[J].Procedia Earth & Planetary Science, 2009, 1(1):1089-1094.

[2] Liu T,Ding L,Meng F,et al.Stability analysis of anti-dip bedding rock slopes using a limitequilibrium model combined with bi-directional evolutionary structural optimization(BESO)method[J].Computers and Geotechnics, 2021, 134(4):104-116.

表4 车辆模型结构参数表

车辆参数		小客车数值
	车总质量 /t	1.5
	车辆总长 /mm	4 338
	车辆总宽 /mm	1 679
	前轮轮距 /mm	1 440
	轴距 /mm	2 642
	车轮半径 /mm	303
车辆重心 位置	距前轴距离 /mm	1 195
	距对称轴距距离 /mm	8(偏向行车方向左侧)
	距地面距离 /mm	511

真计算结果,可见车辆碰撞分隔栏杆后,分隔栏杆构件及其脱离件未侵入车辆乘员舱。综上分析,可见该道路分隔栏的安全性能不满足评价标准要求。

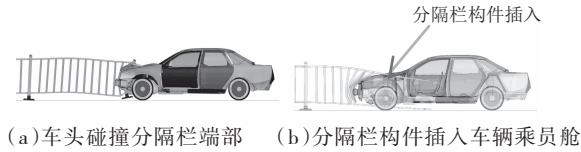


图5 小客车正碰分隔栏杆过程图示



图6 小客车侧碰分隔栏杆过程图示

5 结 语

通过对道路分隔栏的实际应用情况与车辆碰撞事故特征分析,在车辆碰撞分隔栏的事故中,事故车辆主要为小型客车,且分隔栏杆侵入乘员舱造成人员伤害的案例较多,而其他类型伤害较少。在借鉴国内外相关规范的基础上,从碰撞车型及质量、碰撞速度、碰撞角度、碰撞点位置等因素出发,结合分隔栏

事故特征和车辆乘员安全指标,给出了道路分隔栏的碰撞试验参数与安全性能评价标准。碰撞试验参数包含:1.5 t 小客车以 60 km/h 碰撞速度正碰分隔栏端部(碰撞角度 0°)、1.5 t 小客车以 60 km/h 碰撞速度侧碰分隔栏标准段中点(碰撞角度 15°),评价标准要求分隔栏防侵入性能应满足分隔栏构件及其脱离件不侵入车辆乘员舱。通过经试验验证的有限元仿真模型对目前常见的道路分隔栏结构进行安全性能评价,车辆正碰分隔栏端部时,其横向杆件易插入乘员舱,安全性能不满足评价标准要求。

此研究成果为道路分隔栏安全性能评价标准的制定提供了一定借鉴作用。

参考文献:

[1] 李闯民,王凯,甘新众,等.隔离护栏的碰撞试验条件及其标准研究[J].中外公路,2022,42(3):267-271.

[2] 邵静静.基于碰撞隔离护栏形成薄壁长管结构对车灯及乘员下肢损伤的研究[D].青岛理工大学,2019.

[3] Ronspies K, Stolle C, Faller R, et al. Recommended Test Vehicle Update for Manual for Assessing Safety Hardware [J]. Transportation Research Record, 2021, 2675(3):98-111.

[4] AASHTO MASH-2016, Manual for Assessing Safety Hardware (Second Edition)[S].

[5] UNE-EN 1317-2-2011, Road restraint systems - Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets[S].

[6] JTG B05-01—2013, 公路护栏安全性能评价标准[S].

[7] 龚帅,张文豪,刘航,等.既有旧桥梁组合式护栏事故分析与解决方案[J].公路工程,2020,45(6):243-249.

[8] 龚帅,刘航,邓宝,等.在役旧桥梁组合式护栏升级改造研究[J].中外公路,2021,41(1):314-318.

[9] 龚帅,仝瑞金,高建雨,等.F型混凝土护栏坡面参数对安全性的影响[J].广东公路交通,2019,45(5):174-178.

(上接第 237 页)

[3] 车铁成,龚洪苇,简波,等.基于 UDEC 的桥基顺层边坡稳定性数值模拟分析[J].四川建筑,2022,42(1):142-145.

[4] 李剑伟,何勇,杨培果,等.某砂泥岩互层缓倾长大顺层边坡稳定性分析[J].水运工程,2023,605(S1):143-149.

[5] 吴朋宇,张志红,戴福初,等.顺层岩质边坡溃屈变形机制及失稳判定方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(2):517-525.

[6] 谭明健,周春梅,孙东,等.软硬互层顺层岩质边坡破坏试验[J].地质科技通报,2022,41(2):274-281,324.

[7] 冯炜,张菊锋.基于极限平衡法的某边坡稳定性分析与抗滑桩支护

[J].四川建筑,2020,40(6):134-136.

[8] 钟皓,梅志远,张志强.基于复合钢筋杆支护边坡工程的稳定性分析[J].四川建筑,2022,42(6):161-165.

[9] 史彧,李兴华,赵瑞欣,等.顺层岩质边坡锚索锚固参数与优化设计分析[J].公路,2022,67(10):1-8.

[10] 许明,余小越,赵元平,等.顺层状碎裂结构岩质边坡地震动力响应及破坏模式分析[J].岩土力学,2023,44(2):362-372.

[11] 张爱社,祝介旺,高翠兰,等.顺层岩质边坡锚杆拉剪作用力学性能[J].地球科学,2022,47(12):4574-4582.