

基于参数反演的危岩稳定性分析与防治研究

鲜 李

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401120)

摘 要: 为研究危岩稳定性及其破坏后的影响范围,以重庆市巫山县长江支流龙门峡入口处的山体危岩为研究对象,首先调查其现场地质环境条件、前期地质成果数据及地质灾害监测等资料;然后采用数值模拟和极限平衡法,通过参数反演对该危岩体的后部和侧向裂隙贯通程度进行评价;最后对危岩体的致灾运动轨迹进行判定。结果表明:若该危岩体后部和侧向裂隙全部贯通时,危岩安全稳定系数为0.862,处于不稳定状态,若仅后部裂隙贯通时,危岩稳定系数为1.053,处于基本稳定状态,与现场实际情况基本吻合;危岩体发生崩塌破坏后,大部分落石将停留在现状边坡上的道路范围,少部分落石在碰撞弹跳后将进入下方龙门峡水域而危及下方航道通行安全。结合现场实际情况及软件模拟结果,提出了“清危+支撑立柱+锚索”的综合治理措施。

关键词: 危岩崩塌;结构面;参数反演;稳定性分析;数值模拟

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0358-06

Stability Analysis and Prevention Research of Dangerous Rocks Based on Parameter Inversion

XIAN Li

(Chongqing Surveying Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: To study the stability of the dangerous rock and its impact range after failure, taking the dangerous rock at the entrance of Longmenxia, a tributary of the Yangtze River in Wushan County, Chongqing as the research object, its on-site geological environment conditions, preliminary geological result data and geological hazard monitoring data are inspected, and then the numerical simulation and limit equilibrium method are used to evaluate the degree of penetration of the rear and lateral cracks of the dangerous rock mass through parameter inversion. Finally, the disaster causing movement trajectory of the dangerous rock mass is determined. The results show that if the rear and lateral cracks of the dangerous rock mass are all connected, the safety and stability coefficient of the dangerous rock is 0.862, which is in an unstable state. If only the rear cracks are connected, the stability coefficient of the dangerous rock is 1.053, which is in a basically stable state, and is basically consistent with the actual situation on site. After the collapse and damage of the dangerous rock mass, most of the falling rocks will remain within the current road range on the slope, and a small number of falling rocks will enter the Longmenxia water area below after collision and bouncing, which will endanger the safety of the waterway below. Combined with the actual situation on site and software simulation results, the comprehensive management measures of “clearing danger+supporting columns+anchor cables” are proposed.

Keywords: dangerous rock collapse; structural plane; parameter inversion; stability analysis; numerical simulation

0 引 言

重庆市巫山县地处四川盆地东部边缘——大巴山前缘与鄂西山地的接壤地带,属溶蚀—侵蚀—中切河谷低—中山地貌。研究区域受大巴山弧形构造、川东褶皱带及川鄂湘黔隆褶带三大构造体系控制,构造背景复杂,区域内危岩体分布较多。区域内危岩的形成模式、破坏形态,相关的防治措施等一直

是该区域自然灾害领域的研究重点。由于危岩体一般位置较高、所处地形较陡,传统的地质调绘手段难以准确反映危岩空间形态。随着各类测绘手段的快速发展,高位危岩的测绘和识别方法越来越丰富。搭载高像素相机的无人机倾斜摄影可快速获取高位危岩的影像数据^[1-2],从而提取危岩体相关特征参数,为危岩稳定性分析提供依据。危岩在水、风化剥蚀、地震作用等外部荷载的扰动下,极易发生崩塌破坏。邹杨等^[3]对危岩运动轨迹进行数值模拟,并对其可能造成的影响进行了风险分区;王栋等^[4-5]根据工程实例,对无人机和三维激光扫描技术在超高位

收稿日期: 2025-02-05

作者简介: 鲜李(1988—),男,本科,高级工程师,从事岩土工程设计与咨询工作。

危岩勘查中的应用展开了相关研究。

巫山龙门峡入口处地形为河谷岸坡及斜坡地貌,河口平面呈喇叭形,北小南大。随着三峡大坝形成蓄水,长江水位上升,河道口宽度约 290 m,区域内地形起伏较大。研究区为倾向长江的低—中山顺向斜坡,斜坡自然地形坡度均在 30° 以上,地形整体较为复杂。在龙门峡入口处右侧存在危岩体,地形较陡,现场难以准确测量该段危岩的几何尺寸和空间分布形态,导致无法对其稳定状态、运动轨迹等进行定量分析。

为此,本文以龙门峡入口处的山体危岩为研究对象,借鉴前人工作思路,采用无人机测量技术、现场位移监测、定量评价、运动轨迹数值模拟等多路径对该段危岩的状态及破坏后果进行分析预测,并根据研究成果提出针对性的治理方案,也可为区域内类似危岩的判别及综合治理提供实践参考。

1 工程概况

研究区位于重庆市巫山县 5A 级风景区小三峡入口右侧,周边起伏较大,水系两岸绝壁高耸,形成独特的自然景观,但同时也发育了大量的地质灾害源(见图 1)。危岩所处区位为巫山长江流域段支流龙门峡入口处右岸斜坡,区域内构造上位于巫山复式向斜的次级构造龙门峡背斜南东翼,岩层基本呈单斜状产出,产状 $161^{\circ}\angle 31^{\circ}$,坡面外露地层主要为嘉陵江组第 3 段(T1j3)灰岩。该段岸坡的结构面类型为硬性结构面,层间起伏,钙质胶结,结合程度一般。区域内发育有 2 组构造裂隙:①组产状为 $235^{\circ}\angle 75^{\circ}$,延长 3~10 m,张口 3~25 mm,裂面平整,充有粉质黏土,间距 4~8 m;②组产状为 $70^{\circ}\angle 80^{\circ}$,张口 1~13 mm,延深 1~2.5 m,呈雁行排列,裂面平直,间距 1.5~2 m。



图 1 危岩区航拍全貌图

区域内原始地形为单向斜坡,后期经人工改造后在岸坡中部形成较宽的斜坡平台,平台后部岩体随即形成陡壁,出现近竖直状的临空。研究区的危岩体位于岸坡中部的宽平台后侧,岩体前缘竖直状

的临空及其下部软弱结构面为危岩体崩塌形成提供了条件。

图 2 为危岩体后部竖向裂隙及底部结构面实景图。

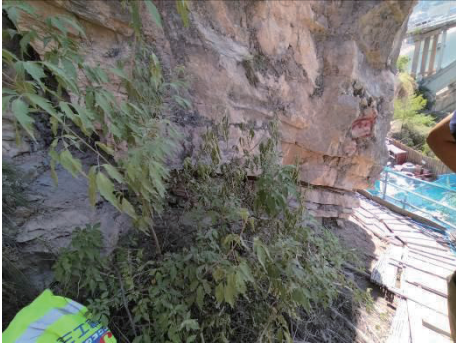


图 2 危岩底座位置竖向裂隙实景图

根据前期无人机测量情况并结合现场地质测绘数据,得到研究范围内危岩的典型横剖面,如图 3 所示。由图 3 可见,该段岸坡属于顺向坡,稳定性受岩层层面控制。岩体受构造运动挤压,内部分布有较多构造裂隙,坡面表层岩体较破碎,在长期应力释放、自重、岩体差异风化等因素影响下,危岩体后部裂隙不断扩张。现场调查时,其后部竖向裂隙开展宽度约 1~5 cm,在 2 组构造裂隙的影响下极易发育形成楔形块类型的崩塌。分析认为,其失稳后可能沿岩层层面发生滑移式崩塌。

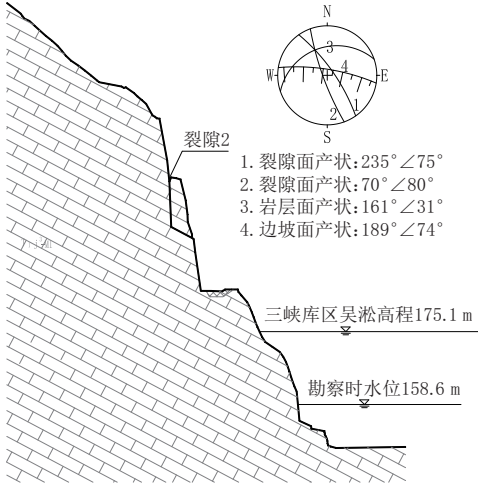


图 3 危岩体典型剖面图

2 危岩变形机制及监测数据分析

危岩体从母岩剥离的机制根据其主要影响因素及成因不同,破坏模式主要有滑移式、倾倒式、坠落式几种^[6]。杨岚峤等^[7]采用监测数据反演了边坡的稳定性,并提出了相关的治理措施;邓宇航^[8]就山区隧道洞口段的危岩及落石危害提出了安全分区,并提出了防控措施;杨树宝等^[9]以三峡库区典型的危

岩为例,针对不同失稳机理的危岩,提出了针对性的治理措施。本文在前人研究的基础上,结合研究区周边危岩失稳模式,对研究区危岩体失稳模式进行判定。本次研究的危岩后部竖向裂隙已形成,底部存在倾角 31° 的软弱结构面,属于典型的滑移式危岩,其后部贯通的竖向裂隙为雨水入渗提供了良好的条件,在后期雨水不断下渗条件下,后部裂隙逐渐扩张,力学参数降低,当沿层面的抗滑力小于下滑力时,即形成崩塌。经现场调查,研究区岸坡整体属于顺向坡,裂缝产状与坡面产状基本一致,该危岩属近似直立的危岩体,一旦发生失稳,将产生沿岩层层面的失稳破坏^[10]。

根据危岩体的裂隙及周边岩体实际情况,前期地质灾害监测过程中在该危岩体范围布置有一定数量的监测点。因落石具备一定的突发性和不确定性,监测点主要布置在危岩体底座位置及顶部区域,通过监测危岩体底座处的相对位移及其后部的竖向裂缝宽度来反映其工作状态。前期的地灾监测数据显示,监测点位的竖直位移和水平位移在整个监测周期内无较大的趋势性波动,该处危岩体整体趋于稳定,仅表面岩体差异风化后易产生掉块等不利现象。

3 基于参数反演的稳定性评价

3.1 基于参数反演的危岩体裂隙贯通程度分析

为探明危岩准确的工作状态,拟对危岩的侧向约束情况进行分析。如图2所示,危岩体前部及靠河侧均为临空面,其约束仅能依靠底座、后部、靠山侧侧面的三向约束。现场调查时,危岩体后部及侧向在地表处均存在裂隙,其中后部裂隙目前已贯通,底部结构面存在一定的泥化。因靠山侧侧面的裂隙贯通情况无法准确观测,为探明其真实状况,采用极限平衡法对该危岩体进行分析。综合前期地质成果数据及地质灾害监测等资料,同时参考地区相近工程的经验,计算采用的物理力学参数如表1所示。

表1 模型采用的岩土体物理力学参数表				
项目	填土	中风化灰岩	岩层面 (天然)	岩层面 (饱和)
重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	20.0	25.6		
黏聚力/ kPa	5	1 200	47	12
内摩擦角/($^{\circ}$)		35.0	17.5	10.0
泊松比	0.35	0.23		
弹性模量/ MPa	8	4 260		

参照地方标准《地质灾害防治工程勘察规范》(DB 50/143—2016),对后缘存在竖向裂缝的岩体采

用平面滑动法进行计算。危岩体所受到的内力主要为危岩体自重,受到的外力主要为后部裂隙及底部层面充水后的静水压力,本项目所处地区为6度区,不考虑地震作用。按照表1参数反演该危岩体的侧向裂隙贯通程度^[11],若饱和工况下计算得到的危岩体稳定性系数小于1.0,则说明其侧向裂隙未贯通,该危岩体处于靠山侧侧向及底部的双向约束状态。表2为该危岩体稳定性系数计算结果。

表2 危岩体稳定性系数计算结果			
侧向裂隙贯通		侧向裂隙未贯通	
天然	饱和	天然	饱和
1.035	0.862	1.148	1.053

结果表明:当该危岩体后部及侧向裂隙全部贯通时,危岩体饱和工况下的稳定性系数为0.862,处于不稳定状态;当其仅后部裂隙贯通时,危岩体饱和工况下的稳定性系数为1.053,处于基本稳定状态,与现场实际情况基本吻合。由此可知,该危岩体的侧向裂隙处于未贯通状态,从而基本确定了危岩体现场实际的边界条件。

3.2 危岩体的数值模拟分析

危岩崩塌受多种因素影响,其整体性失稳的主要影响因素为危岩体后部裂隙的展开情况及充水状态。为探明层面参数及裂隙分布对危岩体稳定性的敏感性,采用离散元模拟软件对危岩的变形特征进行数值模拟,以定量分析研究区危岩崩塌的形成和失稳过程^[12]。根据前期无人机测量并结合现场地质测绘,得到危岩典型横剖面,据此建立的离散元模型如图4所示。



图4 危岩体典型剖面离散元模型图

危岩体在天然工况和饱和工况下的变形趋势见图5。

在天然工况下,危岩体后部裂隙未充水,考虑到

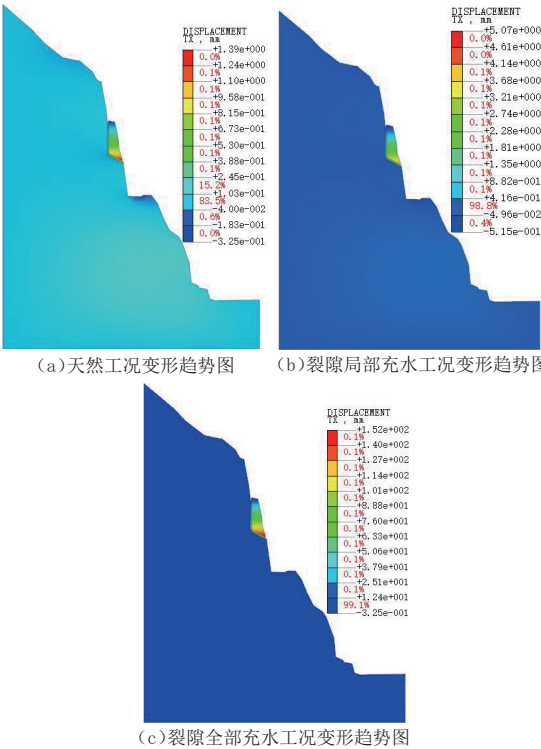


图5 危岩体在天然及饱和工况下的变形趋势图(单位:mm)

危岩体自身重量的影响,危岩体底部出现了一定的拉裂区,致使危岩底部向右侧临空面发生1.39 mm的水平位移,危岩体底部出现微小的剪切变形区,如图5(a)所示。

在降雨季节,危岩体后部裂隙存在如充水工况。本次分析通过在危岩体后部裂隙处添加不同充水高度下的水压力,以此模拟饱和工况下危岩体的变形趋势。图5(b)为危岩体后部裂隙充水高度为裂隙深度一半时的变形趋势图,可看出在裂隙局部充水工况下,危岩体产生了5.07 mm的向右侧水平位移,位置在危岩体前缘下部区域,然后慢慢向后部推移;危岩体顶部则产生了向左的微小水平位移。图5(c)为危岩体后部裂隙全部充水时的变形趋势图,可看出在危岩体全部充水工况下,危岩体前缘下部区域向右的变形趋势明显,相比图5(b),此时危岩体下部变形区域逐渐扩大,出现明显的滑移面,最大水平位移值达152.0 mm,可认为此时危岩体有整体失稳的可能。

综上所述,危岩体的失稳始于危岩体前缘下部。天然工况下,危岩体底部会产生局部的微小剪切变形区;在危岩体后部裂隙逐渐充水工况下,危岩体底部变形趋势逐渐扩大,底部拉裂面逐渐贯通;随着雨水持续进入后部裂隙,危岩体底部结构面充填物质的物理力学参数逐渐降低,最终危岩体发生沿底部结构面的整体滑移,脱离母岩区域后崩塌形成落石,

危及道路及航道安全。

4 危岩致灾运动轨迹分析

危岩发生崩塌后其下落轨迹不仅与崩塌体的质量有关,而且与下部受碰撞的斜坡坡面物质组成及坡脚有关,落石崩塌后的运动轨迹是一个包括崩落、滚动、滑动、撞击后回弹的复合运动^[13]。研究区危岩崩塌后形成的落石极易沿现状岸坡发生滚落及回弹,掉入其下方的道路,同时危及下方航道的通行安全。

根据研究区内危岩失稳后可能发生的运动轨迹建立危岩体数值模型。由力学分析可知,处于高位的危岩体的势能通常高于中下部岩体,危岩体从母岩崩塌后,其具有的势能逐步转化成动能^[14],同时当落石与岸坡面发生碰撞后,因坡面物质组成不同,其碰撞点的法向弹性系数和切向摩擦系数也不尽相同,落石的弹跳高度和运动轨迹也随之发生变化,落石在经过多次碰撞耗能后停止在动能消减为零的位置。

假定危岩体从边坡岩体表面崩塌后向下滚落,采用常用的落石分析软件对落石的运动轨迹和能量衰减情况进行模拟^[15]。研究区整体地形较陡,从落石崩塌点至静止点,落石逐次经历岸坡中的填土质宽平台、灰岩质岸坡、江水以下的灰岩质岸坡。计算选取的相关参数根据边坡岩土体的物理力学特性,同时参考软件中建议取值范围的中间值进行计算,结果见表3。

表3 落石运动分析选取的参数

坡面性质	法向弹性系数	切向摩擦系数	动摩擦系数	坡面现场特征描述
填土质平台	0.20	0.53	0.60	前期为居民房屋和道路,后经拆迁形成岸坡中部的平台区域
灰岩质斜坡面	0.32	0.72	0.39	坡面大部分基岩出露,破表植被较少,局部位置存在低矮灌木
灰岩质斜坡面水下	0.28	0.65	0.45	坡面位于水下,表面无植被覆盖

坡面岩体受地质构造等因素影响,表层存在着卸荷裂隙和风化裂隙,在裂隙充水、岩体差异风化等作用下,岩体表层会发生缓慢的变形。当变形积累到一定程度时,表层岩体从母岩剥离后随即发生崩塌,形成落石。落石的水平初速度一般很小,假定为0.1 m/s,随机选取50次落石模拟,以得到落石掉入长

江支流龙门峡水域的概率。为得到落石崩塌后较为准确的运动轨迹,依据对现场危岩体裂隙的调查,结合无人机测量数据,裂隙充水后危岩失稳形成的落石体积为0.02~0.32 m³,因此,本次选取的落石质量分别为50、800 kg。图6、图7分别为落石的总动能分布图和跳跃高度分布图。

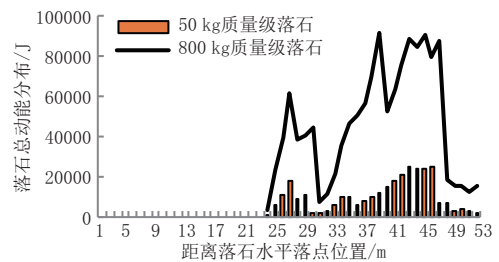


图6 落石的总动能分布图

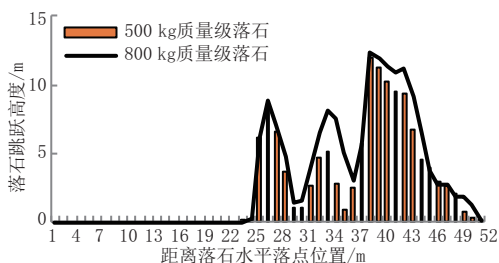


图7 落石跳跃高度分布图

根据验算,800 kg 质量级落石弹跳高度较 50 kg 质量级落石高,最大弹跳高度约 12 m,坠落后掉入水域的可能性较大。处于高位的落石具备的初始势能较大,整体弹跳高度相对较高,其坠落后掉入水域的概率较大,风险等级较高。

从图6、图7可看出,大部分落石将停留在现状边坡的宽平台及斜坡坡面处,少部分落石在碰撞弹跳后将进入下方龙门峡水域。随着崩塌后形成的落石质量增加,落石的初始势能转换成的总动能也有一定程度的增加。根据对落石运动轨迹的反演模拟,可以较为真实地反映落石的运动轨迹。由图7可推断,崩塌后形成的50 kg 质量级落石掉入下方水域的概率为30%,崩塌后形成的800 kg 质量级落石掉入下方水域的概率将达到45%。可见该处危岩崩塌后形成的落石掉入水域的可能性较大,将对航道通行构成较大的安全隐患。以上分析可作为危岩崩塌后的运动形式推测,也可作为危岩的针对性治理措施提供参考。

5 综合治理措施

通过对该危岩采用无人机测量技术、现场位移监测、定性分析及定量评价、运动轨迹数值模拟等多种识别及分析方法,认为该处危岩整体处于基本稳

定状态。但受构造裂隙和岩体差异风化等因素影响,边坡岩体易形成小型的崩塌、掉块等不利现象。为此,针对此处危岩的实际状态,提出了“清危+支撑立柱+锚索”的综合治理措施,如表4所示。

表4 危岩的治理措施建议

不利现象	针对性的治理措施
表层风化掉块	及时清除易掉块的岩体表面薄层、倒悬的小块危岩,局部位置可针对性地喷射混凝土,确保施工期间的岩体表面稳定
岩体底部基座泥化	研究区危岩为顺向坡,倾角31°,受构造裂隙影响后形成危岩体,其底部的岩层界面采用泥质填充,界面参数较低,为提高该处危岩的稳定性,拟对危岩底的岩层界面凹腔处用混凝土填充并支撑,同时采用肋柱式锚索挡墙加固
排水不畅	为不影响危岩体治理后边坡岩体的排水路径,在危岩体底座位置及其上方增设深层泄水孔,及时疏排岩层表面处的雨水,减小雨水对边坡岩体的影响

6 结 语

(1)根据无人机对研究区危岩体现场的测量情况以及现场监测数据得到的危岩体定量评价和数值模拟结果更加可信,为危岩体的治理提供了科学依据。

(2)研究区危岩在天然工况下整体稳定性较好;在饱和工况下,危岩体底部结构面参数将降低,出现明显的剪切位移区,危岩体有失稳的可能。

(3)通过模拟危岩失稳后形成的落石运动轨迹,其落点将危及下方道路安全。结合周边岸坡治理措施,拟对该处采用“清危+支撑立柱+锚索”的治理措施,以确保下方道路和航道安全。

参考文献:

[1] 康星云. 基于倾斜摄影的高位危岩特征获取和稳定性评价——以重庆万州观音山危岩带为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 66-75.

[2] 杨绪波,程强,袁进科,等. 基于无人机倾斜摄影的危岩识别及数值模拟分析[J]. 人民长江, 2023, 54(6): 112-119.

[3] 邹杨,刘毅,李建强,等. 基于无人机模型的危岩运动模拟及风险区划[J]. 铁道工程学报, 2023(2): 6-12.

[4] 王栋,邹杨,张广泽,等. 无人机技术在超高位危岩勘查中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 754-759.

[5] 黄江,石豫川,吉锋,等. 三维激光扫描技术在高边坡危岩体调查中的应用与讨论[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 45-49.

[6] 占建琴,唐辉明,熊承仁,等. 鄂西恩施地区岩石物理力学参数的相关性[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(4): 42-46, 51.

[7] 杨岚峤,易武,黄晓虎,等. 基于数值模拟的危岩崩塌特征及防治研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3): 132-135.

[8] 邓宇航. 复杂艰险山区隧道洞口段危岩落石防控关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.

[9] 杨树宝,陈安军,雷瑞新,等.高陡峡谷区危岩防治技术:以三峡库区巫峡典型危岩为例[J].水利水电技术(中英文),2023,54(增刊1):341-347.

[10] 严健华.高陡斜坡危岩块体定位及动力致灾研究[D].长春:吉林大学,2023.

[11] 李武.基于边坡实测数据的岩土体参数反演研究及稳定性分析[D].重庆:重庆交通大学,2024.

[12] 温辉波,张帮鑫,龙春宇,等.基于实时监测数据的边坡稳定性分析及加固治理[J].土工基础,2024,38(1):46-50.

[13] 张龙强.景区危岩灾害风险分析与控制研究——以古剑山危岩治理为例[D].重庆:重庆交通大学,2023.

[14] 张永海,谢武平,罗忠行,等.四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):37-46.

[15] 丁浩江,张广泽,岳志勤.坪上隧道口危岩落石失稳模式及运动特征分析[J].铁道工程学报,2015(12):7-11.

(上接第 353 页)

[2] 王启云,林华明,臧万军,等.深厚软弱地层坑内土体加固对支护结构变形的影响[J].福建工程学院学报,2018(2):8-12.

[3] 熊海明,周军要,陈双,等.长短桩在深厚软土条件下深基坑支护中的应用[J].土工基础,2024(2):29-34.

[4] 范洪波,赵东旭,马圣毅,等.浅岩层静压植桩施工技术[J].建筑技术,2025(1):223-225.

[5] 李洪亮,尚振奇,石野,等.复杂地质条件下钢板桩引孔施工技术研究与应用[J].建筑结构,2021(6):2328-2332.

[6] 卓珊,陈俊驰.拔桩前降水和桩孔回填对地表及邻近建筑物的变形影响研究[J].市政技术,2024(5):129-137.

[7] 张广涛.超厚粉细砂地层大面积围堰水下封底施工技术[J].施工技术,2018(3):30-33.

[8] 何书杰.建筑施工中基坑降水施工技术分析[J].建筑技术开发,2023(4):77-80.

[9] 熊勃,柳建新,郭典塔.逆作拱墙法支护结构在复杂地层管道塌陷处理中的应用探讨[J].广东土木与建筑,2024(8):114-117.

[10] 孙安,史慧婷,赖德贤,等.鸭涌河综合整治工程-过澳边界跨河供水管关键技术分析[J].城市道桥与防洪,2020(12):121-123.