

某砂岩顺层挖方高边坡治理工程施工期变形特征与工程效果评价

朱彦鹏, 施多邦, 段新国, 吴林平, 王 楨, 吕向向, 滕振银

Deformation characteristics and engineering effect evaluation of a sandstone bedding excavation high slope treatment project during construction

ZHU Yanpeng, SHI Duobang, DUAN Xinguo, WU Linping, WANG Zhen, LYU Xiangxiang, and TENG Zhenyin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyuan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37

秦望山隧道南口高陡岩质边坡稳定性分析及治理效果评价

建议文章标题

郝社锋, 蒋波, 喻永祥, 宋京雷, 徐昊, 孙少锐 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(2): 89-97

土质滑坡地表倾斜变形特征与基于MEMS的倾斜变形监测技术初探

Evolution of deformation and monitoring techniques of surface tilt for soil landslides using MEMS technique

刘晓宇, 樊智勇, 吴疆 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 69-77

滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan

付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 123-132

基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27-35



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202012

朱彦鹏, 施多邦, 段新国, 等. 某砂岩顺层挖方高边坡治理工程施工期变形特征与工程效果评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 111-119.

ZHU Yanpeng, SHI Duobang, DUAN Xinguo, et al. Deformation characteristics and engineering effect evaluation of a sandstone bedding excavation high slope treatment project during construction[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 111-119.

某砂岩顺层挖方高边坡治理工程施工期变形特征与工程效果评价

朱彦鹏^{1,2}, 施多邦^{1,2}, 段新国^{1,2}, 吴林平^{1,2}, 王 楨³, 吕向向^{1,2}, 滕振银^{1,2}

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 为了研究砂岩顺层挖方高边坡支护工程施工期间及施工后的边坡变形规律和治理工程效果, 文章依托北京某边坡支护项目, 对边坡在施工过程中的锚索轴力及边坡位移进行监测分析, 结果表明: 锚索轴力变化主要分为加速损失阶段、波动阶段以及持续稳定趋变阶段; 锚索轴力变化可以很好地反映坡体内力的变化情况; 坡顶水平位移和竖向沉降的变化, 可以反映边坡深层位移的变化规律和边坡的稳定性; 框架预应力锚索抗滑桩组合支护体系应用于砂岩顺层挖方高边坡的支护时, 具有较好的支护效果。采用有限元分析软件, 模拟该砂岩顺层挖方高边坡的开挖支护过程发现: 随着边坡的开挖, 坡体位移沿着软弱滑动面向坡角发展, 边坡稳定性降低。将监测结果与模拟结果对比分析, 发现二者的变化趋势基本一致, 证明了该边坡的支护体系能有效地控制边坡的变形。研究成果能为以后类似边坡的设计施工提供参考。

关键词: 挖方高边坡; 工程治理效果; 变形趋势分析; 稳定性; 软弱滑动面; 数值模拟

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)02-0111-09

Deformation characteristics and engineering effect evaluation of a sandstone bedding excavation high slope treatment project during construction

ZHU Yanpeng^{1,2}, SHI Duobang^{1,2}, DUAN Xinguo^{1,2}, WU Linping^{1,2},
WANG Zhen³, LYU Xiangxiang^{1,2}, TENG Zhenyin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Western Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation Engineering Research Center, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. China Railway Northwest Research Institute Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: In order to study the slope deformation law during and after the construction of the sandstone bed-cut high slope support project and the effect of the treatment project, this paper relies on a slope support project in Beijing to analyze the axial force of the anchor cable and the slope during the construction process. The slope displacement is monitored and analyzed, and the results show that the change of the axial force of the anchor cable is mainly divided into the acceleration loss stage, the

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-05-28 投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金(51978321); 教育部长江学者创新团队支持计划项目(IRT_17R51)

第一作者: 朱彦鹏(1960-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事支挡结构方面的科研工作。E-mail: zhuypl@163.com

通讯作者: 施多邦(1995-), 男, 甘肃永登人, 硕士研究生, 主要从事支挡结构方面的研究。E-mail: 1791170508@qq.com

fluctuation stage and the continuous stable trend stage; the change of the axial force of the anchor cable can well reflect the change of the internal force of the slope; the change of horizontal displacement and vertical settlement can reflect the change law of the deep displacement of the slope and the stability of the slope, has a better support effect. The finite element analysis software was used to simulate the excavation and support process of the sandstone-layered high slope. It was found that with the excavation of the slope, the displacement of the slope developed along the slope angle of the weak sliding surface, and the stability of the slope decreased. The monitoring results and the simulation results are compared and analyzed, and it is found that the change trends of the two are basically the same, which proves that the slope support system can effectively control the deformation of the slope. The research results can provide reference for the design and construction of similar slopes in the future.

Keywords: excavation high slope; project management effect; deformation trend analysis; stability; weak sliding surface; numerical simulation

0 引言

近年来随着我国经济的飞速发展,建设用地需求量越来越大,因而产生了大量的挖方边坡。边坡工程的建设,易受地形地质、场地环境、施工条件等因素的影响,其中砂岩顺层边坡自身稳定性不足,易受降雨、地震、人类活动等因素的影响,导致此类边坡的建设出现了一系列工程问题^[1-4]。

砂岩顺层挖方高边坡地质情况复杂,影响因素多变,边坡稳定性问题突出^[5-7],结构与边坡的作用机制复杂,现阶段理论分析仍然滞后于工程实践,因此有必要对该类边坡进行深入研究。孟祥铭^[8]、黄秋香等^[9]、李京榜等^[10]、朱彦鹏等^[11]应用现代化监测手段对岩质边坡的开挖支护过程进行了全方位监测,对边坡的内力和变形规律进行了总结,并对边坡支护效果进行了评价。高大水等^[12]、王旭日^[13]、关松等^[14]、周勇等^[15]通过岩质高边坡的健康监测及数值模拟,对边坡在支护过程中的稳定性情况、内力变化情况以及结构与坡体的相互作用规律进行了深入地研究与讨论。陶志刚等^[16]、何满潮^[17]对锚索受力状态,加固效果进行了分析,并建立了边坡滑动模型,实现了边坡滑动的精准预报。以上文献对边坡支护过程中,支护结构的变形,坡体的内力变化,以及工程治理效果等方面进行研究,得出许多科学的规律,能够有效地指导施工。但对于复杂地质条件下砂岩顺层挖方高边坡在施工阶段进行原位监测的研究还相对较少。

本文依托某砂岩顺层高边坡支护项目,对边坡支护工程施工全过程进行原位监测,同时采用 PLAXIS 2D 有限元分析软件对该边坡开挖支护全过程进行数值模拟,以期对该类边坡在施工过程中锚索轴力变化情况、坡体变形情况、坡体稳定性情况等进行分析,得到一定的规律,并对该工程的治理效果进行评价。

1 工程背景

1.1 工程概况

该项目地处北京市门头沟区戒台寺北侧,边坡总长约 600 m,治理高度在 50~90 m。治理前,坡度约 30°,如图 1 所示。边坡主要地层为:1)人工杂填土:含大量碎石、厚 1~2 m。2)炭质砂岩:灰黑色,泥质结构为主,薄页状层理构造。因设计要求需进行大规模土方开挖,开挖后坡体基本坡率为 1:0.75~1:1。该段坡体治理形式均为框架预应力锚索加预应力抗滑桩组合支护形式,边坡施工现场如图 2 所示。



图 1 边坡加固前照片

Fig. 1 Photos before slope reinforcement

1.2 工程地质概况

该边坡地质构造复杂,地层裂隙发育,受矿产资源开采的影响,导致边坡岩层结构破碎。坡体内有一软弱滑动面,边坡稳定性受软弱滑动面控制,已发生多次不同程度的滑动。

2 施工监测方案

2.1 监测目的

通过监测边坡在支护过程中锚索轴力、坡顶水平

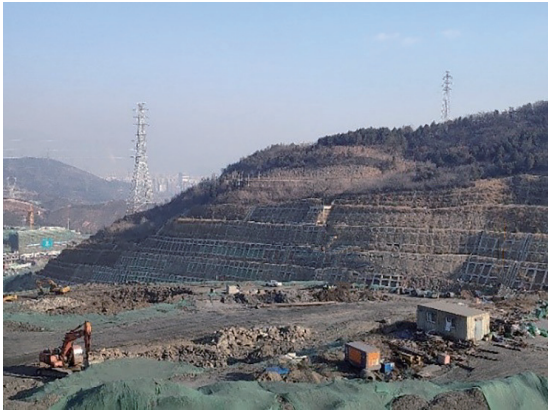


图 2 高边坡施工现场照片

Fig. 2 Photo of high slope construction site

位移以及坡顶沉降的变化情况, 来分析边坡的变形趋势, 判断边坡的稳定性, 评价治理工程效果。

2.2 监测内容

该段坡体开挖后极易沿着软弱滑面发生整体滑动, 故坡面上各点的位移变化趋势具有一致性。坡体变形时, 坡顶位移响应最为明显, 故选取坡顶为位移监测点, 在边坡施工过程中对锚索轴力、坡顶水平位移、坡顶沉降进行现场监测。主要监测仪器有水准仪、全站仪和 TRC-MS-03A 振弦式锚索计。测点布置如图 3 和图 4 所示。

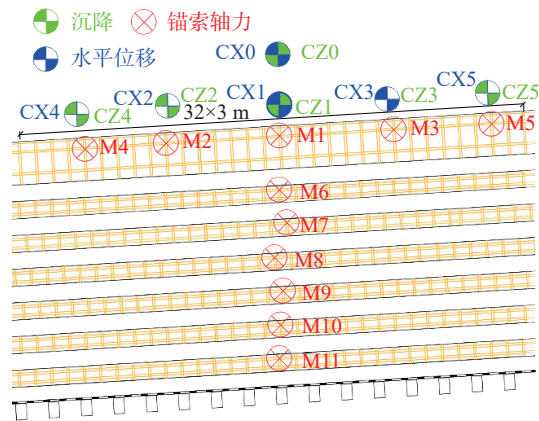


图 3 测点立面图布置图

Fig. 3 Elevation layout of measuring points

3 施工期边坡变形和支护工程受力特征

3.1 坡顶锚索轴力变化特征

该工程锚索的锚固力、锚索长度和锚固位置如图 4 与表 1 所示。锚固初期, 锚索轴力受坡体开挖、框架梁变形、岩体裂隙等因素影响, 锚索轴力先急剧减小, 随着坡体以及支护结构内部应力发生重分布, 锚索轴力出

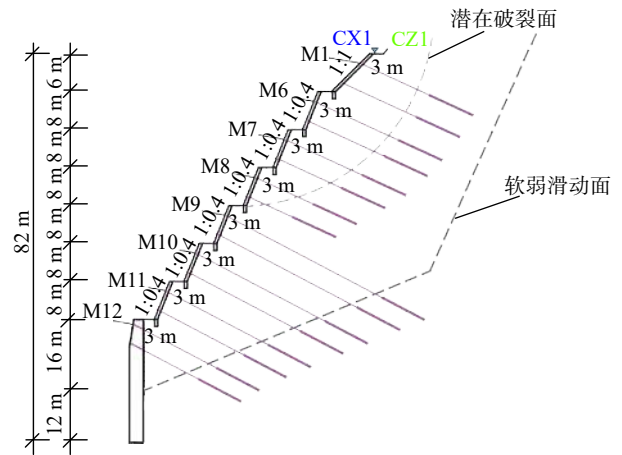


图 4 监测点剖面布置图

Fig. 4 Monitoring point profile layout

现小幅度的波动, 最终锚索轴力逐渐趋于稳定。锚索轴力的变化可分为三个阶段, 即: 加速损失阶段、波动阶段和持续稳定趋变阶段^[10,12]。图 5 为坡顶锚索轴力时程曲线。

表 1 支护参数及说明

Table 1 Support parameters and description

坡级	锚索支护参数
八级坡	6 Φ 15.2, $l=26$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN
七级坡	6 Φ 15.2, $l=28$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN
六级坡	6 Φ 15.2, $l=27$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN
五级坡	6 Φ 15.2, $l=22$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN
四级坡	8 Φ 15.2, $l=47.5$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN
三级坡	8 Φ 15.2, $l=34.5$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN
二级坡	8 Φ 15.2, $l=31$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN
抗滑桩	8 Φ 15.2, $l=41$ m, $l_{\text{锚}}=10$ m, 设计轴力 672 kN

2019 年 6 月 5 日至 2019 年 8 月 19 日为锚索轴力损失阶段, 监测结果显示, 在锚索张拉之后半个月, 锚索轴力急剧下降, 其原因是: 该边坡岩体强度较低, 裂隙发育; 坡体内部岩体破碎, 注浆过程中漏浆情况严重, 导致锚固体饱满度较差, 故在锚索张拉时坡体的塑性变形十分大; 此外, 施工中发现锚具以及垫板也存在不同程度的损坏, 因此, 锚具和垫板的质量也是一个重要的原因。

2019 年 8 月 19 日至 2020 年 6 月 14 日为波动阶段, 在该阶段锚索轴力在波动地情况下缓慢下降, 且该阶段持续时间最长, 其原因是: 随着边坡开挖和支护交替进行, 坡体受力不断发生变化, 所以锚索轴力也出现波动; 该边坡岩层结构破碎, 岩体自稳能力差, 故在边坡开挖后, 上层锚索轴力会大幅增大, 支护后, 随着下层锚索的张拉, 上层锚索的锚固力会有一定程度的降低。

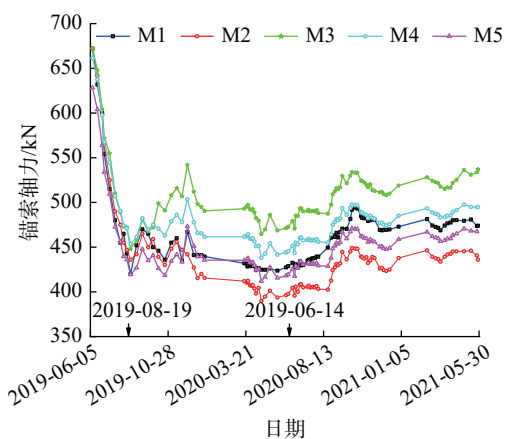


图 5 坡顶锚索轴力时程曲线图

Fig. 5 Time-history curve of the axial force of the anchor cable on the slope top

2020年6月14日至2021年5月31日为稳定趋变阶段,该阶段锚索轴力随着时间的发展逐渐趋于稳定,其原因是:随着锚索逐级施加,边坡的抗滑能力逐渐上升,锚索轴力变化幅度减小,抗滑桩施工完成后,锚索轴力变化渐渐趋于平稳。该现象反映了支护体系的协同工作效果良好,表明该边坡支护是成功的。

3.2 坡顶水平位移变化特征

图6为坡顶水平位移时程曲线,由图可知各测点的位移变化规律基本一致。在2019年8月19日之前坡面位移增速较快,其原因是:该阶段属于锚索预应力调整阶段,随着坡体与支护体系之间的应力调整,锚索预应力损失较大,所以坡面位移增速较快。2019年8月19日到2020年6月14日间,各测点的位移变化出现波浪变化现象,坡顶位移总体呈增大趋势,其原因是:在开挖导致坡体应力释放,坡面水平位移增大,当下级锚索

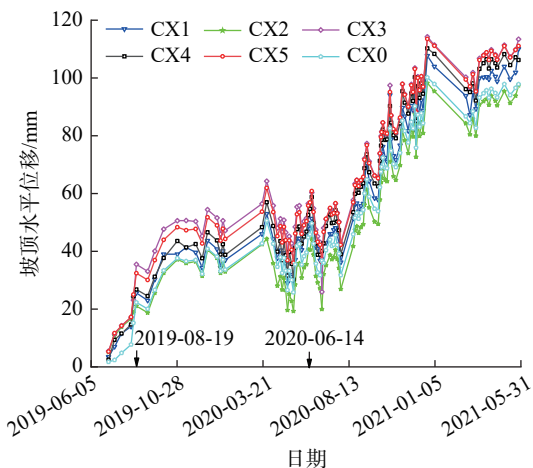


图 6 坡顶水平位移时程曲线图

Fig. 6 Time history curve of horizontal displacement of slope top

张拉锚固后,锚固端向坡体内收缩,坡面水平位移急剧减小。2020年6月14日至2020年12月25日,坡面水平位移增速变快,坡面位移呈波浪式上升,其原因是:随着坡体的开挖,坡体内部滑面受到扰动,滑面抗剪强度降低,所以坡体位移变化较大。

2020年12月25日之后,坡面位移变化速率逐渐放缓,最终稳定下来,其原因是:随着支护体系逐渐施工完成,坡体约束变多,开挖对坡顶位移变化的扰动敏感性降低,坡顶位移增量减小。

3.3 坡顶沉降特征

图7为坡顶沉降时程曲线图,从图中可以发现,2020年6月14日之前坡顶沉降呈波浪形变化,坡顶沉降较为稳定,其原因是:2020年6月14日之前,边坡开挖深度较浅对坡体扰动不大,边坡开挖时,由于坡体内应力释放,边坡出现沉降变形,之后随着支护的进行,坡体受力,所以坡顶沉降值减小,但总体来看,坡顶沉降较小,坡顶沉降呈波浪形变化,该现象说明了框架预应力锚索结构很好地控制了边坡变形。

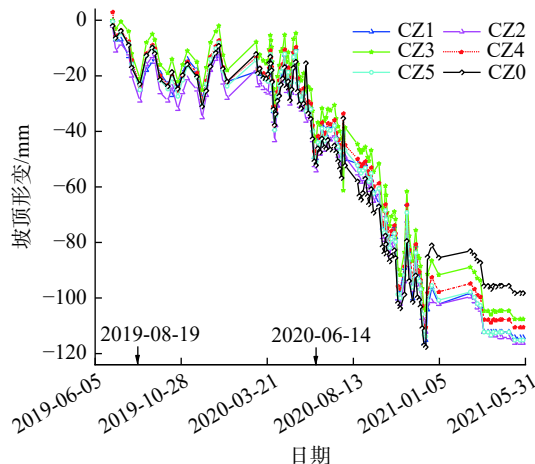


图 7 坡顶沉降位移时程曲线图

Fig. 7 Time history curve of slope top settlement and displacement

坡顶沉降在2020年6月14日至2020年12月25日之间坡顶沉降量增加迅速,2020年12月25日之后坡顶沉降速率逐渐稳定,其原因是:随着边坡的开挖,边坡内部软弱滑动面受力状态改变,边坡出现滑动,所以坡顶沉降速率较大。但是随着框架预应力锚索的施工,坡体约束增多,所以坡顶沉降得到了良好的控制。

3.4 锚索锚固力和坡面水平位移对比

为了研究锚索轴力和坡面水平位移的关系,下面选取相同位置的锚索轴力和坡面水平位移对两者的相关性进行分析。

图8为坡顶水平位移与锚索轴力时程关系曲线,可以发现锚索轴力和坡顶水平位移存在着“一增一减”的关系,其原因是:在锚固初期锚索轴力损失较快,所以坡顶水平位移也迅速增长。在2020年6月14日之前,锚索锚固力随着时间的推移损失速率变慢,坡顶水平位移增长速率变慢,但是从两者的变化趋势来看,位移变化比较灵敏。两者的变化可以互相对比验证,便于更好地判断边坡稳定性情况。

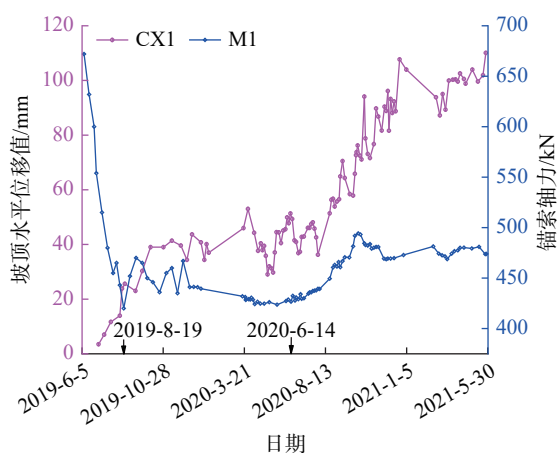


图8 坡顶水平位移与锚索轴力时程关系曲线

Fig. 8 The time-history relationship curve between the horizontal displacement of the slope top and the axial force of the anchor cable

观察发现2020年6月14日至2020年12月25日,锚索轴力变化较为平缓,但坡顶水平位移却增幅较大,2020年12月25日之后坡顶水平位移变化趋于平缓,其原因是:2020年6月14日前对坡体开挖扰动不大,所以锚索轴力变化明显。2020年6月25日后随着边坡的开挖深度变大,对坡体扰动增大,边坡出现深层滑动,所以坡顶水平位移增量明显,但锚索锚固力变化较小。2020年12月25日之后随着边坡框架锚索与坡脚抗滑桩的施工完成,边坡深层滑动得到很好的控制,坡顶水平位移变化趋于稳定。

4 基于数值模拟的边坡变形与治理工程受力特征分析

4.1 有限元数值模型的建立

采用PLAXIS 2D有限元分析软件建立了该边坡的数值模型,模型考虑了潜在滑动面对边坡开挖的影响。为简化计算,抗滑桩、框架梁采用板单元进行模拟;锚索锚固段采用土工格栅进行模拟,该结构是具有轴向刚度而没有侧向刚度的细长单元;锚索自由段采用点对点锚杆单元模拟,该结构是既可以承受拉力又可以承受压

力的单元,可以考虑锚索预应力损失^[18]。本工程可看作平面应变问题,考虑边界及施工对计算的影响^[15,19],模型范围定为200 m×130 m,网格进行局部加密,共划分生成39 030个单元,503 283个节点,模型顶部为自由边界,两侧为水平边界,底部为固定边界,计算参数见表2—3,有限元模型如图9所示。

表2 场地土层主要物理力学参数

Table 2 The main physical and mechanical parameters of the soil layer of the site

材料名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
碳质砂岩	>80	27.2	0.25	18.0	38.0
滑面	/	24.5	0.30	11.0	28.0
薄弱面	/	20.0	0.25	12.0	30.0

表3 结构主要计算参数表

Table 3 Structure main calculation parameter table

参数	抗滑桩	自由段	锚固段	框架梁
重度/(kN·m ⁻³)	25	67.60×10 ⁶	39×10 ⁶	25
弹性模量/(kN·m ⁻²)	3.25×10 ⁷	弹性模量与截面的乘积为	2.06×10 ⁸	3.25×10 ⁷
尺寸	3 m×2 m	1.42×10 ⁵ kN	直径0.13 m	0.18 m×0.16 m

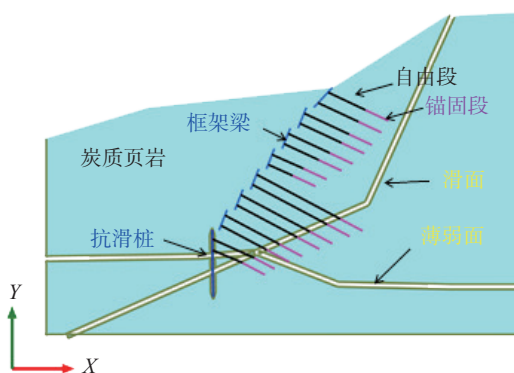


图9 有限元数值模型

Fig. 9 Finite element numerical model

4.1.1 施工步骤

由于该边坡开挖较深,挖方量大,边坡土方开挖应严格遵循“随挖随支、严禁超挖”的原则,具体施工步骤如表4所示。

4.2 数值模拟结果

4.2.1 坡体变形

(1)前四级支护完毕位移特征

图10为前四级支护完毕后边坡的变形云图。由图可知,前四级支护完毕,边坡浅层位移较小,说明前四级框架预应力锚索使得边坡浅层位移得到了很好的控制,

表 4 具体施工步骤

Table 4 Specific construction steps

步骤	说明
工况1	初始地应力分析
工况2	八级坡开挖
工况3	八级坡施工框架预应力锚索
工况4	七级坡开挖
工况5	七级坡施工框架预应力锚索
工况6	六级坡开挖
工况7	六级坡施工框架预应力锚索
工况8	五级坡开挖
工况9	五级坡施工框架预应力锚索
工况10	四级坡开挖
工况11	四级坡施工框架预应力锚索
工况12	三级坡开挖
工况13	三级坡施工框架预应力锚索
工况14	二级坡开挖
工况15	二级坡施工框架预应力锚索抗滑桩施工
工况16	施工抗滑桩预应力锚索
工况17	开挖到坡底

边坡深部滑面处位移最大,最大位移为 56 mm,且深部位移沿着软弱滑动面由边坡后缘逐渐减小,滑坡上部土体出现滑动,变形图较为直观地体现了开挖扰动后该边坡为后缘滑动推动前缘的推移式滑动模式。表明边坡受开挖扰动后,具有发生推移式破坏的趋势,该边坡危险程度高。

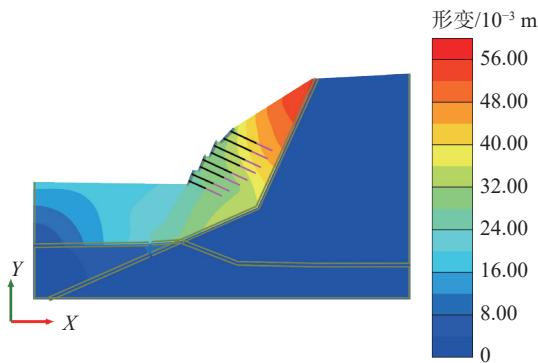


图 10 前四级支护完毕坡体变形云图

Fig. 10 Cloud map of slope deformation after the first four levels of support are completed

(2)前第六级支护完毕位移特征

对比图 10、图 11 发现前六级支护完毕,边坡的滑动范围明显增加,边坡位移最大处出现在滑面上且位移量明显增大,最大值为 95 mm。坡体上部发生明显的滑动,深部位移沿着软弱滑动面由边坡后缘向坡脚处继续发展,边坡后缘已发生滑动,但可以发现边坡在第三四

级锚索与滑面交界处边坡的位移值明显小于滑面上部,说明预应力锚索的施加使得土体稳定区与框架结构之间产生了很大的拉力,增加了边坡的稳定性。

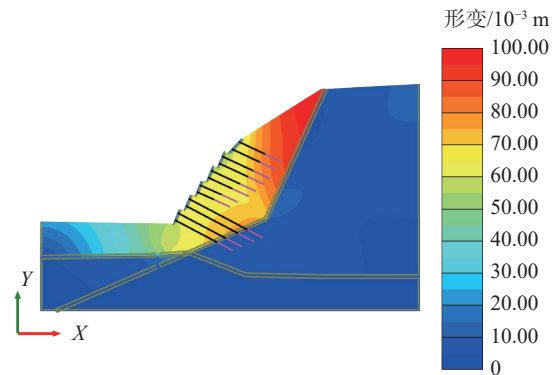


图 11 前六级支护完毕坡体变形云图

Fig. 11 Cloud map of slope deformation after the first six levels of support are completed

(3)边坡支护完毕位移特征

由图 12 可知边坡支护完毕之后,边坡位移量沿着滑面从上到下越来越小,其原因是:该边坡土层性质较差,随着边坡深层逐渐被揭露,边坡上部土体对下部土体挤压力变大,边坡在深部滑面上发生滑动。坡脚处虽然采用了抗滑效果很好的预应力抗滑桩,但由于土层性质较差,土体侧向抗力不足,所以还是产生了一定的位移。

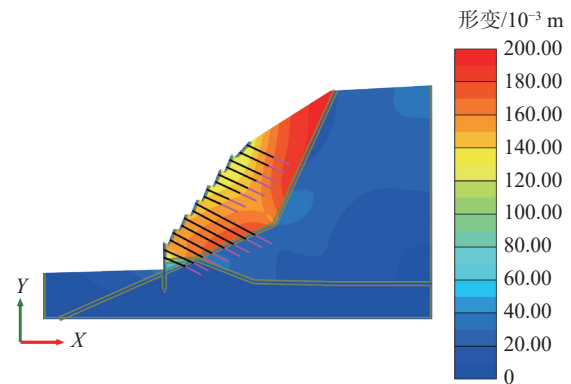


图 12 抗滑桩施工完成后坡体变形云图

Fig. 12 Cloud map of slope deformation after the completion of anti-sliding pile construction

4.2.2 边坡稳定性

采用强度折减法计算边坡稳定性,得到支护过程中边坡稳定性系数的变化情况,如图 13 所示,边坡开挖后稳定性系数会发生降低,支护后边坡稳定性系数会有小幅上升,在前 4 阶段边坡稳定性系数变化不大,在阶段

8 时边坡稳定性系数出现一次较大幅度的降低, 其原因是: 随着边坡开挖受扰, 边坡出现浅层滑动, 但由于支护结构的作用, 边坡仍处于稳定状态, 在开挖到工况 10 时, 边坡稳定性系数突然降低, 其原因是随着边坡内部岩体揭露, 边坡深层滑动面受到扰动, 所以边坡稳定性系数出现较大变化, 但边坡稳定性系数呈现波浪式变化, 反映出支护结构对边坡稳定性起到了很好的控制效果。可以发现支护完毕边坡稳定系数为 1.43, 表明该项目的治理效果良好。

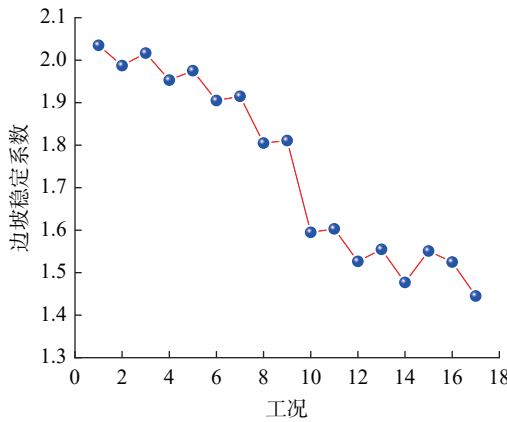


图 13 不同工况下边坡稳定性系数

Fig. 13 Slope stability coefficient under different working conditions

4.2.3 数值模拟结果与监测结果对比

本节选取相同工况下的各项数据进行对比分析, 因施工步骤不同步, 各工况施工时长存在差异, 故本节拟采用边坡对应工况施工完毕当日的监测数据与各模拟工况下的计算值进行分析。

(1) 坡顶锚索轴力

选择该边坡坡顶处的锚索 M1 的轴力值, 将其各工况下的数值模拟结果与监测数据进行对比分析, 如图 14 所示。

由图 14 可以看出, 模拟结果和监测结果变化规律具有一定的一致性, 在支护前期锚索轴力均发生一定的损失, 随着边坡不断受到扰动, 锚索锚固力有所上升, 最终锚索轴力趋于稳定。模拟值总体上较监测值大, 分析其原因是: 建模参数较为理想, 且建模没有考虑时间等因素的影响, 故数值模拟结果较监测值有一定的差异。

(2) 坡顶水平位移

选择边坡坡顶 CX1 处的监测点, 将其各工况下的数值模拟结果与监测数据进行对比分析, 如图 15 所示。

由图 15 可知随着开挖的进行, 坡顶水平位移逐渐增大, 前 8 个工况对坡体扰动较小, 故坡顶水平位移增速缓慢, 工况 8 之后, 坡体深层滑面受到扰动, 边坡位

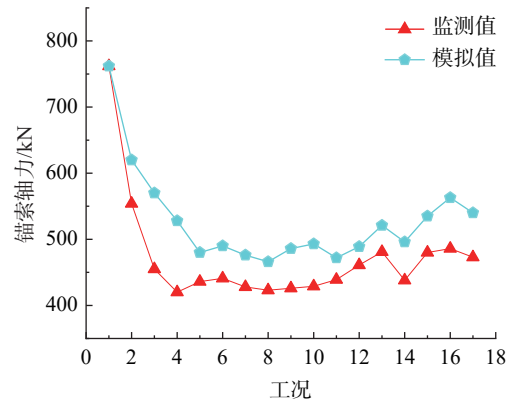


图 14 坡顶锚索模拟值与监测值对比分析图

Fig. 14 Comparison and analysis diagram of simulated and monitored values of anchor cables on the top of the slope

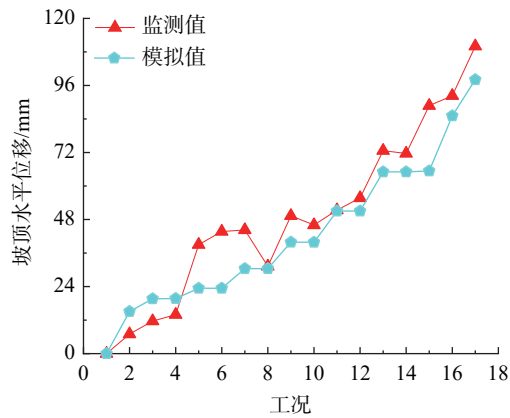


图 15 坡顶水平位移模拟值与监测值对比分析图

Fig. 15 Comparison and analysis diagram of slope-top horizontal displacement simulation value and monitoring value

移增速较为明显, 施工完毕后坡体水平位移监测值为 110.7 mm, 数值模拟结果为 98.05 mm, 两者差值为监测值的 12.8%, 未超过控制值 180 mm 的要求, 故边坡处于安全状态。

(3) 坡顶沉降

选择该边坡坡顶 CZ1 处的监测点, 将其各工况下的数值模拟结果与监测数据进行对比分析, 如图 16 所示。

由图 16 可以看出数值模拟结果与实际具有很好的 consistency, 在工况 8 之前两者均小幅度增加, 工况 8 之后坡顶沉降增速明显, 这与坡顶水平位移的变化规律相似, 该边坡产生滑动的的原因是坡内滑面的抗剪强度不足, 由 4.21 节的分析可知工况 8 以前坡体的扰动主要是滑面上部, 工况 8 以后产生扰动的部位主要为滑面下部, 因为滑面上部的倾角较大, 且坡体的砂岩弹性模量较大, 故边坡产生的竖向位移较小, 滑面下部滑面倾角

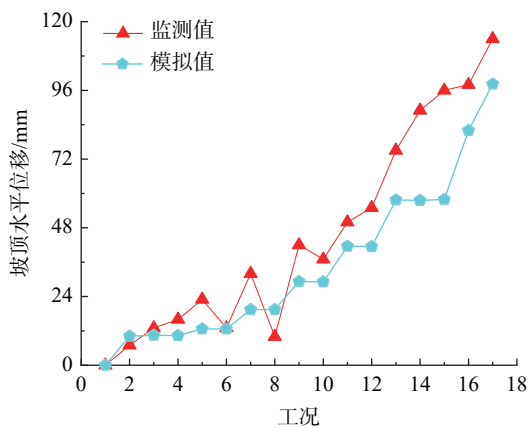


图 16 坡顶沉降模拟值与监测值对比分析图

Fig. 16 Comparison analysis diagram of slope-top settlement simulation value and monitoring value

较小, 工况 8 之后随着滑面下部受扰发生滑动, 坡顶竖向沉降以及坡顶水平位移均较大。支护完成后坡顶沉降监测值为 114 mm, 数值模拟值为 98.19 mm, 两者差值为监测值的 13.86%, 未超过控制值 180 mm 的要求, 故边坡处于安全状态。

4.2.4 工程治理效果评价

根据监测数据和数值模拟结果的分析, 对该工程的治理效果进行评价。监测数据显示, 边坡支护完毕, 锚索轴力变化趋于平稳, 边坡位移变化基本稳定。根据数值模拟分析, 该边坡支护完毕, 边坡变形在允许范围内, 边坡稳定性系数较大, 表明工程的治理效果良好。

5 结论

本文通过对某砂岩顺层高边坡施工过程中的监测数据进行分析, 并结合数值模拟得出如下结论:

(1) 该类边坡治理工程中对锚索轴力以及边坡的变形进行实时监测, 可以掌握施工过程中边坡稳定性的变化情况, 保证边坡的安全稳定。

(2) 监测结果发现, 锚索轴力变化主要分为加速损失阶段、波动阶段以及持续稳定趋变阶段; 锚索轴力变化可以很好地反映坡体内力的变化情况; 坡顶水平位移和竖向沉降的变化, 可以反映边坡深层位移的变化规律和边坡的稳定性。

(3) 数值模拟发现, 随着对边坡的扰动增加, 坡体位移逐渐增大, 边坡稳定性降低。边坡有发生推移式破坏的趋势, 但随着支护结构的施工完成, 边坡稳定系数趋于稳定且数值较大, 边坡的轴力变化逐渐稳定, 边坡变形均在允许范围内, 表明该边坡的变形基本得到控制, 边坡支护是成功的。

参考文献 (References):

- [1] 宛良朋, 汤开宇, 李建林, 等. 深部软弱岩体置换体对岩质边坡支护效果分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 476-480. [WAN Liangpeng, TANG Kaiyu, LI Jianlin, et al. Supporting effect analysis of deep weak rock mass replacement for rock slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 1): 476-480. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 邓安. 多锚点抗滑桩在北京戒台寺滑坡治理工程中的应用研究 [D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2007. [DENG An. Application of multi anchor-points anti-slide pile in controlling jietaisi temple landslide in Beijing [D]. Beijing: Academy of Sciences of the Ministry of Railways, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 朱志刚. 北京双大路碎裂岩质滑坡灾变机理及控制技术 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. [ZHU Zhigang. Mechanism and controlling techniques of landslide in cataclastic rock mass of shuangda road in Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 成永刚. 滑坡的区域性分布规律与防治方案研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013. [CHENG Yonggang. Study on regional distribution discipline of landslides and prevention programme [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 蒲凯超. 某顺层岩质边坡开挖支护过程及其稳定性响应 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020. [PU Kaichao. The excavation and support process of a bedding rock slope and its stability response [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 廖海军, 祁生文, 杨存进, 等. 北京市戒台寺滑坡发生发展机理研究 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 585-592. [LIAO Haijun, QI Shengwen, YANG Cunjin, et al. Mechanism for initiation and development of Jietai temple landslide in Beijing [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(5): 585-592. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 汪维. 门头沟深挖顺层软岩高边坡支护结构多目标优化设计研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020. [WANG Wei. Research on multi-objective optimization design of support structure of high soft rock slope in Mentougou deep excavation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 孟祥铭. 现代监测手段在黑岱沟露天矿边坡中的应用研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012. [MENG Xiangming. Research on modern monitoring means and its application for Heidaigou open pit slope [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 黄秋香, 汪家林, 邓建辉. 基于多点位移计监测成果的

- 坡体变形特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 2667-2673. [HUANG Qiuxiang, WANG Jialin, DENG Jianhui. Slope deformation character analysis based on monitoring results of multiple multi-point borehole extensometer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 1): 2667-2673. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李京榜, 朱彦鹏, 叶帅华, 等. 某二级高边坡健康监测试验研究与分析 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 129-134. [LI Jingbang, ZHU Yanpeng, YE Shuaihua, et al. Health monitoring tests on a secondary high slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup 1): 129-134. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 朱彦鹏, 李京榜, 叶帅华, 等. 基于锚索格构梁支护结构的高边坡健康监测研究与分析 [J]. 工程力学, 2015, 32(增刊1): 271-276. [ZHU Yanpeng, LI Jingbang, YE Shuaihua, et al. Health monitoring and analysis on high slope anchor lattice beam supporting structure [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(Sup 1): 271-276. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 高大水, 曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 653-656. [GAO Dashui, ZENG Yong. Monitoring analysis on prestress state of anchor cable of high slope of the tgp permanent shiplocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 653-656. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王旭日. 某泥岩砂岩互层高边坡监测与稳定性分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016. [WANG Xuri. The monitoring and stability analysis of a interbedding high slope of mudstone and sandstone [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 关松, 谭运坤, 赵娜. 锦屏一级电站高陡顺层边坡支护内部安全监测分析 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 16-19. [GUAN Song, TAN Yunkun, ZHAO Na. Monitoring analysis of internal safety for high-steep bedding slope supporting in Jinping I hydropower station [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2013, 35(2): 16-19. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 周勇, 王旭日, 朱彦鹏, 等. 强风化软硬互层岩质高边坡监测与数值模拟 [J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2249-2258. [ZHOU Yong, WANG Xuri, ZHU Yanpeng, et al. Monitoring and numerical simulation of an interbedding high slope composed of soft and hard strong-weathered rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2249-2258. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陶志刚, 罗森林, 朱淳, 等. 滑坡动力学监测及破坏过程案例分析 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(1): 177-186. [TAO Zhigang, LUO Senlin, ZHU Chun, et al. Dynamic mechanical monitoring of landslide and case analysis of failure process [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 177-186. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081-1090. [HE Manchao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1081-1090. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘志祥, 张海清. PLAXIS 3D基础教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015. [LIU Zhixiang, ZHANG Haiqing. PLAXIS 3D basic course [M]. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)]
- [19] 米海珍, 胡燕妮, 李春燕. 土木工程专业本科系列教材弹性力学(第2版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. [MI Haizhen, HU Yanni, LI Chunyan. A series of undergraduate textbooks for civil engineering Elastic mechanics (2nd Edition), [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)]