

费晓欧, 缪海宾, 陆丹丹. 开挖蓄水条件下边坡破坏机理及稳定性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 202-210. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240055
FEI Xiaou, MIAO Haibin, LU Dandan. Failure mechanism and stability of slope under excavation and water storage[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 202-210. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240055

开挖蓄水条件下边坡破坏机理及稳定性研究

费晓欧¹, 缪海宾^{2*}, 陆丹丹³

(1. 辽宁石油化工大学 土木工程学院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司 露天煤矿灾害防治与生态保护国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122; 3. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究开挖蓄水对边坡上部重要建(构)筑物的影响, 利用物理实验探究开挖和蓄水过程中边坡岩体的应力、变形、地表沉降以及孔隙水压力的变化情况, 对开挖扰动以及蓄水的作用下边坡体与断层构造带变形、破坏特征及其规律进行分析。研究表明: 开挖会导致岩体应力重新分布, 近坡面应力变化较大, 开挖时上盘岩体在自重力的作用下会沿断层破碎带产生相对错动。蓄水初期, 边坡坡体表面受到动静水压力作用产生压密变形, 内部孔隙水压力升高, 边坡向临空面变形, 坡顶出现沉降趋势。实验结果可为高陡露天煤矿滑坡防控提供理论参考。

关键词: 边坡稳定性; 开挖卸荷; 坡体变形; 沉降; 滑坡

中图分类号: TD854

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0166-09

Failure mechanism and stability of slope under excavation and water storage

FEI Xiaou¹, MIAO Haibin^{2*}, LU Dandan³

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines, China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China; 3. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of important buildings and structures on the upper part of the slope under excavation and water storage, physical experiments are used to explore the changes of stress, deformation, surface settlement and pore water pressure of the slope rock mass in the process of excavation and water storage. Meanwhile, deformation, failure characteristics and laws of the slope and fault tectonic zone under excavation and water storage are analyzed. The results shows that excavation will lead to the redistribution of the stress of the rock mass, the stress of slope surface will change greatly, and the upper wall rock mass will have a relative dislocation trend along the fault fracture zone under the action of self-gravity during excavation. At the initial period of water storage, the surface is compacted by the dynamic and static water pressure, the internal pore water pressure increased, the slope is deformed to the free side, and also settlement trend appears at the top. The results can provide a basis for the prevention and control of landslides in high and steep open-pit coal mines.

Keywords: slope stability; excavation and unloading; slope deformation; sedimentation; landslide

0 引言

露天矿区的边坡破坏会造成巨大的经济损失。工程经验表明露天开采过程中, 边坡的变形与应

力的特征不同^[1]。随着油页岩层的厚度增加, 上覆岩相对减少, 内倾体滑动缓慢, 因此露头边坡暴露时间延长, 暴露面积明显增大, 这种情况不利

收稿日期: 2024-03-07 修回日期: 2024-04-29 接受日期: 2024-05-10 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001901)

作者简介: 费晓欧(1983-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士, 讲师, 主要从事矿业工程方面的研究。E-mail: 22708622@qq.com

通信作者: 缪海宾(1984-), 男, 福建寿宁人, 博士, 研究员, 主要从事露天安全方面的研究。E-mail: 14900214@qq.com

于边坡面的稳定性和边坡开采,影响进一步回收端部覆岩下的油页岩资源^[2]。正确评价边坡稳定性并采取相应的预防措施,对于保证生产、建设和人民的财产安全具有重要意义^[3]。

相对于边界相似性高、地质水土特征复杂的实际模型,地质力学模型试验是研究边坡机理的有效方法,能够较为完整地反映实际情况^[4]。为更好地了解开挖和蓄水过程中边坡的破坏机理和边坡响应特征,许多学者开展模型试验研究。LI等^[5]进行了降雨的地质力学模型试验,探究不同深度倾斜薄弱夹层对层状岩质边坡位移与应力的影响。研究表明当蓄水量增大时,最大位移从表层转移到夹层较弱的结构中。薄弱夹层的塑性变形促进了裂缝形成,导致更多水流入斜坡,从而在薄弱夹层的斜坡中引起更大变形。WANG等^[6]建立了含弱夹层岩体系统的力学模型,提出边坡失稳前岩体破坏程度的评价指标,发现弱夹层边坡的破坏模式为滑动破坏-切割层破坏-张拉破坏。

露天开采倾斜矿层形成的高陡边坡极易受到环境影响而引起大变形或滑坡。LI等^[7]研究了新疆倾斜煤层端坡的破坏机理与位移应力分布,结果表明边坡基底的变形主要发生在水平方向上,最大水平位移主要集中在边坡底部区域。DAI等^[8]研究了地下逆采扰动对顺层岩质边坡变形、破坏和滑坡的影响,结果表明在地下开采的影响下,初期与后期均为牵引型滑坡,开采时,岩土裂缝会持续削弱软弱层理面边坡的力学强度。LUO等^[9]分析了抽水蓄能在露天矿中的应用,提出抽水蓄能在废弃露天矿中的多种应用模式。ZHANG等^[10]提出结合岩体分类系统与边坡质量等级法的研究方法,分析边坡可能的破坏方式与变形机制,并考虑结构面与开挖方法对边坡稳定产生的影响。

在上述研究的基础上,基于相似理论,选取典型抚顺露天矿地质剖面,建立开挖及蓄水边坡物理模型,开展试验台研制,模拟边坡3次开挖过程与蓄水水位模拟矿坑成湖过程。记录每一次开挖扰动引起的边坡体变形、坡顶地表沉降与坡体内部应力变化,分析边坡变形以及地表沉降规律与边坡失稳机理。在蓄水模拟矿坑成湖过程中,记录每个蓄水期内边坡坡体变形、地表沉降与坡体内部压力、孔隙水压力变化情况。分析蓄水成湖导致边坡体变形、内部应力改变以及孔隙水压力变化过程及其演化机制。

1 工程地质背景

随着油页岩矿的大量开采,矿石开采成本不断提高,目前为了保持企业的经济产能加速提升与可持续发展,矿山采用全地下开采方法。油页岩矿体具有埋藏浅、储量大等优点,因此设计了露天开采的方法,岩体在露天边界合理开采范围内。在持续性的露天开采中,人为的高边坡和原有边坡的安全稳定与矿山的安全生产密切相关。露天边坡一旦发生失稳,就可能对矿山的安全生产与周围城市地质安全造成影响。

抚顺西露天矿区地质条件和水文条件均异常复杂,在矿区内部存在水污染、矿体滑坡、地面裂缝等多种地质灾害,这些灾害对周边城市和基础设施造成了不同程度的损坏,严重影响城市居民区的安全。因此为研究该露天矿分次开挖和蓄水对周围环境所造成的破坏程度,需对抚顺天矿边坡安全稳定性进行评价^[11]。

抚顺西露天矿东西长6.6 km,南北宽2.2 km,面积约14.5 km²。该地区内地貌特征是在垂直方向上起伏较大的丘陵区,由人工改造为梯台地形的矿坑区域。开挖过程中,随着采深的不断增加,矿坑南帮煤层底板与西露天矿南帮形成的千台山(标准高度为214 m)垂直深度为400~500 m。此外,千台山北部地表与矿坑南部相连,随着采矿的进行过程,矿坑南帮表面土壤被逐渐剥落,显露出内部的玄武岩,并且在开挖卸载的作用下,边坡不稳定性进一步加剧。

采矿区地层新至老为:第四系冲洪积层、人工堆积层;始新统古城子组、计军屯组、西露天组;新生界古近系古新统老虎台组、栗子沟组;太古界花岗片麻岩等^[12]。

1.1 相似原理及实验材料选定与地质模型构建

(1) 相似原理及实验材料选定

相似理论定律是物理模拟试验分析研究的基础,将其作为工程原型与物理模型间确定相似比例的工具,为确定相似条件提供基本依据^[13]。目前,方程分析法、定律分析法、量纲分析法均可由相似准则导出。应用量纲分析法可以在研究现象相似的过程中对各种物理量量纲进行分析,进而得到与边坡实际的物理问题相关的参数表达方式。

在进行物理仿真模拟或实验分析之前,应使构建的工程物理模型与实际情况尽可能地相似,

以保证物理模型在模拟实验中的试验结果能够及时反馈到具体工程设计中。几何结构相似是物理现象完全相似的先决条件,通过对工程物理模型建筑材料与实际工程设计原型边坡在几何尺寸特征的对比,得出其相似程度比例尺。同时应使工程物理模型与实际设计原型滑坡建筑材料的力学基本参数保持比例关系^[14]。

采用不同类型的材料构建地质模型时,首先比较各种相似材料组合后的性能和优缺点,再考

虑模拟对象为油页岩、玄武岩,边界条件为开挖、蓄水。结合模型试验在相似材料方面的研究,最终采用的相似原材料为黄砂、石膏、水泥和水。选用液压油调节相似材料的渗透特性,彩色铁粉作为染色剂区分不同岩土层^[15]。

为简化物理模型,结合原型和模型各参数之间的相似比,计算相应模型的物理力学参数。边坡开挖蓄水池的模拟试验模型物理力学参数见表1。

表 1 开挖蓄水模拟实验模型参数

Tab.1 parameters of the experimental model for excavation and water storage simulation

岩性	容重 (/kN·m ⁻³)	内聚力 (/kPa)	内摩擦角 (/°)	弹性模量 (/MPa)	泊松比	抗拉强度 (/kPa)	抗压强度 (/kPa)	渗透系数 (/m·s ⁻¹)
油页岩	16.15	0.154	35	2.60	0.26	0.260	2.60	3.2×10 ⁻¹¹ ~9.6×10 ⁻⁹
玄武岩	21.54	0.138	40	5.50	0.14	3.850	38.50	3.2×10 ⁻⁹
第四系	13.85	0.023	28					
褐色页岩	16.92	0.076	25	0.90	0.30	0.230	2.00	6.3×10 ⁻⁹ ~6.3×10 ⁻⁸
煤层	11.54	0.107	35	0.90	0.24	0.180	1.80	3.2×10 ⁻⁹ ~3.2×10 ⁻⁸
回填物料	15.38	0	29	0.60	0.30	0.003	0.03	
断层F1、F1A	15.38	0.009	20	1.55	0.30	0.690	6.90	
断层F3-4	15.38	0.009	7	0.38	0.30	0.200	2.00	
白垩纪砂岩	17.69	0.100	45	3.08	0.25	0.770	7.70	

(2) 地质模型构建

根据对抚顺西露天矿区边坡工程地质条件的分析,选定抚顺露天矿边坡处作为开挖模拟试验及蓄水模拟试验典型剖面。本试验模型箱尺寸为200 cm×50 cm×100 cm,由5块厚为2.5 cm的高透明亚克力板、固定框和角钢夹具组成。根据模型试验及原始边坡的相似关系确定几何相似比,开挖、蓄水模拟试验模型的几何相似比为1:1 000,尺寸为200 cm×50 cm×95 cm,边坡剖面见图1。试验前期准备工作完成后开始填料,根据相似理论确定不同的配比方案,填筑完成后在自然状态下养护一周,再进行试验。

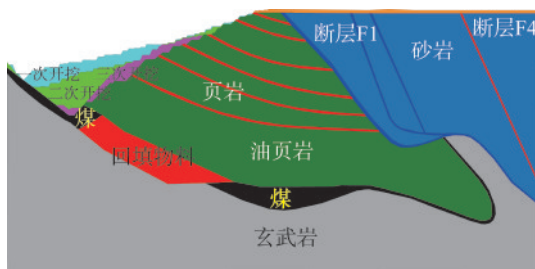


图1 地质模型边坡剖面

Fig.1 section of slope of geological model

1.2 监测手段

按年度边坡轮廓线分3次进行开挖实验。利用数字图像监测装置、百分表位移计、土压力盒分别探测开挖过程中的坡体变形、地表沉降和坡体应力的变化。变形观测点布置见图2(a)。观测点1~5平行于边坡,观测开挖边坡下部位移;观测点6~10平行于地表,观测地表沉降;观测点11~13位于边坡内部,观测内部软弱夹层的变形;观测点14~18位于断层处,观测断层变化差异。开挖时地表沉降监测点布置见图2(b)。监测点W1、W2位于坡体上部坡面位置,监测点W3、W4、W5位于坡顶处。坡体应力监测点T1~T4为平行于坡面位置处并朝向岩层面外法线方向处,坡体应力监测点T5~T7为垂直于坡顶自上而下布置。

试验准备阶段,将土压力盒和动态静态应变采集仪连接,设置数据采集频率为0.1 Hz,采用全桥方式连接。仪器调试正常后,将初始值调零。待准备工作就绪后,启动位移监测装置,开始监测,并对边坡进行挖掘。一次开挖结束后,每1 min对百分表读数一次;1 h后,每5 min对百分表读数一次;2 h后,每10 min对百分表读数一次。单次的

实际监测时长应超过3 h,以保证模型内部达到完全稳定状态。当各传感器及百分表示数达到稳定状态后,方可进行下一次开挖,直至3次开挖模拟试验数据稳定,结束试验。

蓄水实验共分为5期进行,记录每次蓄水后的坡体变形及地表沉降、坡体应力变化和孔隙水压力变化。蓄水时坡体位移变化监测点的布置与开挖时布置方式相同,见图2(c)。观测地表沉降时,监测点W1、W2、W3位于坡体表面,监测点W4~W7位于坡顶。因在蓄水时水位上升没过百分表位移计,故在三期蓄水时去掉监测点W1,四期蓄水时去掉监测点W2,五期蓄水时去掉监测点W3。在蓄水实验时土压力计放置位置与开挖时一致。在检测孔隙水压力变化时,模型边坡共设置10个渗压计,均布置于周期变化水位标高以下,渗压计S1~S4及S5~S8依次交替布置于坡体中轴线纵剖面两侧,渗压计S9、S10分别布置于坡体中轴线纵剖面,距离中轴线12 cm。

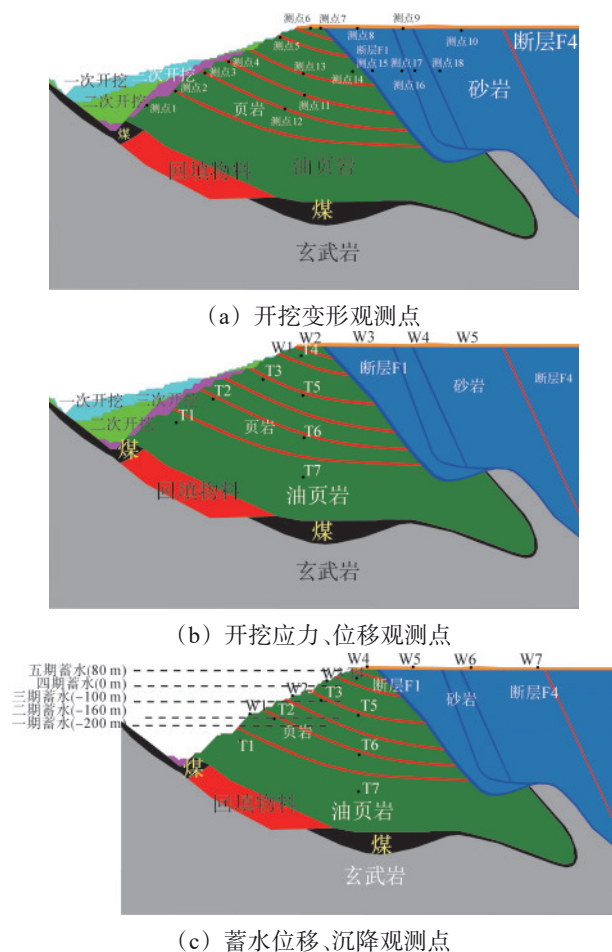


图2 开挖、蓄水观测点示意、布设

Fig.2 schematic of excavation and water storage observation point and layout

2 结果与讨论

2.1 开挖边坡变形分析

利用Origin软件处理观测点变形量数据中的异常值,各观测点3次开挖试验变形曲线见图3。由图3可以看出近坡面变形量最大,这是由于边坡中下部岩体的过量开挖使此区域坡角度最大造成的。开挖初期,观测点4发生卸载变形,随着坡体内应力不断调整,变形逐渐增大但变形幅度逐渐减小。观测点1最先发生变形,这是由于观测点1位于坡脚处,在受到开挖扰动时,应力集中响应最为明显。近坡面区域的水平变形均大于竖直变形,开挖形成的边坡坡脚较小,开挖坡面受到的水平应力变化大于竖直应力,变形位置均位于褐色页岩弱层。9 000 s之后,各观测点的位移均趋近于平稳。这是因为油页岩与褐色页岩的互层区域整体变形较小(图2绿色区域,为油页岩与褐色页岩互层),断层破碎带及断层F4附近变形最小。随着基坑开挖深度的持续增加,内部岩体逐步向基坑边坡坡面过渡并产生变形,其变化范围逐渐随之扩大,坡体表面的变形量开始显著大于其周边内部的岩体。

随着深度向基坑坡体表面内部继续延伸,变形发生量也明显趋于减小。边坡开挖的影响区域位于边坡到坡体内部F1断层破碎带左侧。坡体表面变形带处在一定范围内,并随边坡开挖深度的增加而逐渐变大,这是因为边坡开挖而引起的应力及卸载作用导致应力重新分布,从而在坡体表面上产生宏观蠕变变形^[16]。自开挖以来,在区域内,边坡岩体表面的较大范围内都出现了不同程度的位移,且位移量随时间变化不断增大。在近坡面中部(测点4)水平变形最大为0.397 3 m,这是因为该区域处于开挖线上方的软弱褐色页岩岩层中。位于F1断层破碎带以下的复式褶曲构造范围内的岩体,垂直位移较大,表明该部位岩体和上盘倾侧岩体在自重应力的作用下沿弱层面有错动。在断层破碎带F1上下盘区两边两条测线上的观测点14和观测点15的变形曲线上表现出较大差异,下盘区的垂直位移量较上盘大,与上盘岩体相比发生整体的错动下滑。位于断层F42上下盘区两边两条测线上的观测点17和观测点18,也有此规律。断层上下盘区变形方向大致相同,断层并不是整体移动,而下盘区的垂直位移量较上盘大,与上盘岩体相比发生整体的错动下滑;可以认为

断层破碎带对整个研究范围内的坡体变形影响明

显,产生了压缩错动变形^[17-18]。

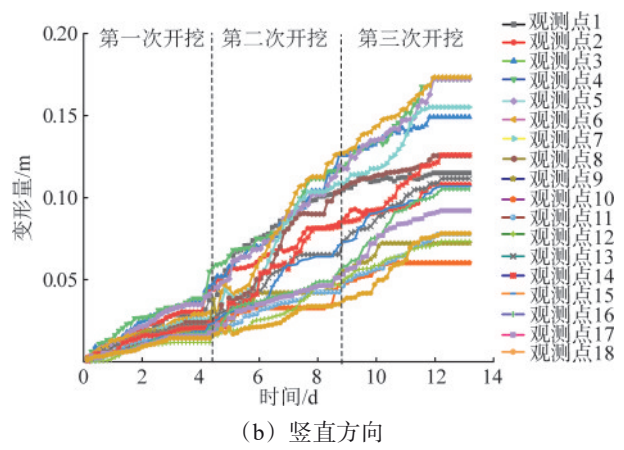
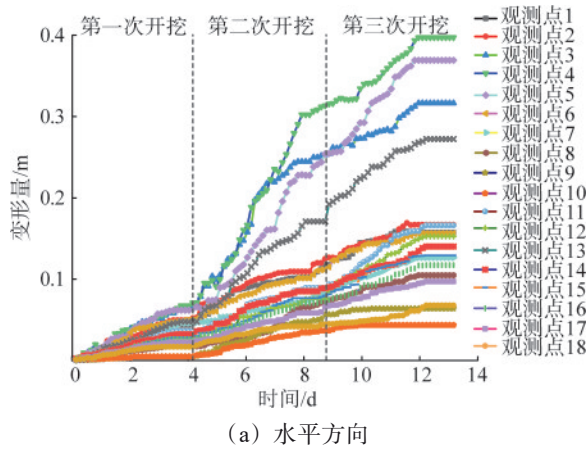


图3 开挖时位移变化

Fig.3 displacement changes during excavation

边坡开挖时得到最终累计变形见图4。由图4可见,试验中地表统一下降,第二次地表沉降变化最快,这是因为第二次开挖的深度最大,形成了最大坡角。本次开挖模拟试验的几何相似比为1:1 000,时间相似比为1:31.6,由此可得地质原型在三次开挖后地表的最终沉降量,其中,坡肩处(探测点W1)的累计沉降量最大,为0.178 2 m。地表距离边坡表面越远地表沉降越小,地表累计沉降变化见表2。

2.2 应力变化与结构面关系

开挖过程中的应力变化见图5。

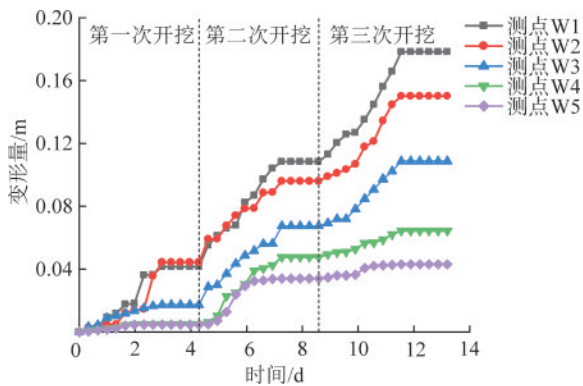


图4 开挖时地表沉降规律

Fig.4 surface settlement during excavation

表2 地表累计沉降变化

Tab.2 cumulative subsidence of land surface

观测点	开挖试验沉降量/m	蓄水试验沉降量/m
W1	0.178 2	0.015 5
W2	0.150 1	0.022 6
W3	0.108 7	0.029 8
W4	0.064 3	0.041 2
W5	0.043 0	0.029 6
W6		0.027 8
W7		0.024 9

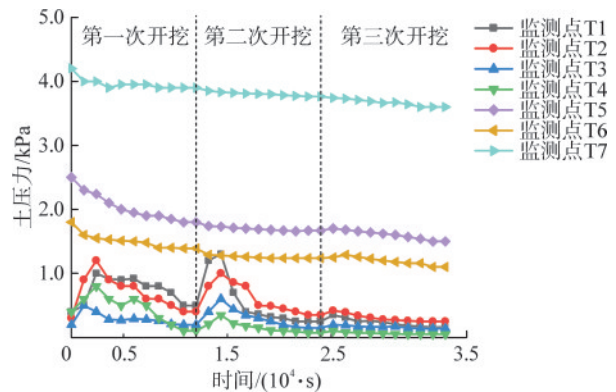


图5 开挖全过程应力变化曲线

Fig.5 stress curve of the whole process of excavation

由图5可见,监测点T5、T6、T7的应力变化趋势较为平稳,这是因为这3个监测点设在边坡内部深处,土压力较大,应力变化不明显。监测点T5、T7受压面均朝向地表,监测点T6受压面朝向岩层面外法线方向,监测点T7的土压力最大,为3.77 MPa。监测点T1~T4的土压力分别在2 400 s、14 400 s、25 200 s附近呈现先增大后减小现象。这3个时间分别处于3次开挖过程中,这说明坡体表面下方受开挖影响,会出现短时的应力升高,原因是坡内各点应力的重分布使测量点的应力出现短暂性增大,但随着时间的推移,坡内应力减小。开挖坡面附近的应力释放量最大,而其他位置的应力变化不明显。就土压力变化幅度而言,监测点T1~T4大于监测点T5~T7,这说明随着深度增加,土压力受开挖的影响越来越小。监测点T4土压力最小,为0.05 MPa,说明在边坡坡脚处受开挖的影响最

大,变化也最大。由图5可知,边坡开挖过程中,坡内应力变化过程复杂。开挖完成后,边坡临空面附近监测点的应力不是瞬间释放并达到一个较大值,而是一个持续长期释放的过程。

2.3 蓄水时边坡变形分析

五期蓄水试验观测点1~18累计水平变形曲线见图6,垂直变形曲线见图7。

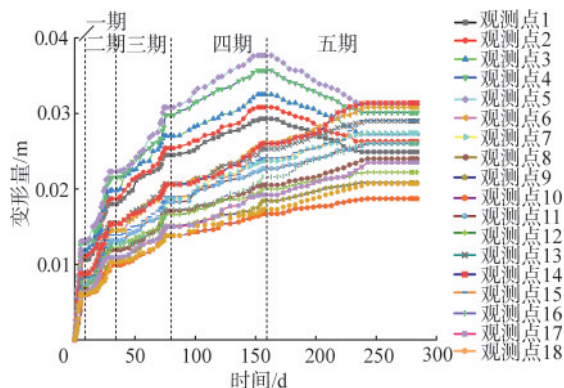


图6 蓄水时边坡观测点的水平位移

Fig.6 horizontal displacement of slope observation points during impoundment

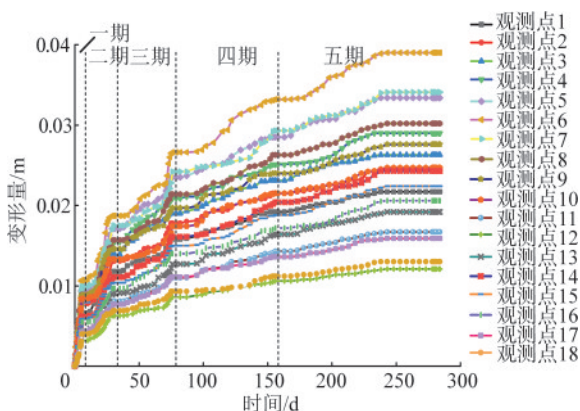


图7 蓄水时边坡观测点的垂直位移

Fig.7 vertical displacement of slope observation points during impoundment

由图6、图7可知,水平位移变化呈现“台阶式”分布,水平位移在最高蓄水位的调整节点附近快速增大,随着时间的推移,变形变化放缓,逐渐进入平台区,此区域位移变化相对较小。这说明在水位变动的初期,孔隙水环境不断调整,对边坡变形的的主要影响是孔隙水流动产生的动水压力,其次是相对平稳水环境中的静水压力。此时间段,边坡大变形主要由动水压力造成,其次静水压力使边坡发生累进性破坏。由各监测点最大位移的发生时间可知,边坡低高程部位的岩体

变形早于高高程部位,说明蓄水导致边坡的破坏是先从坡脚开始,逐渐后退至坡体中部,形成累进性破坏。

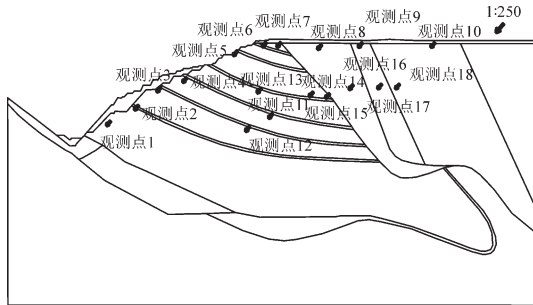
蓄水初期,边坡主要产生压密变形。由于受到水指向坡体内部的载荷,水位线以下的岩体在一定程度上增强了坡体的稳定性,水平位移、垂直位移等趋于稳定,边坡变形趋于收敛,但蓄水一段时间后,这种现象被静水压力产生的破坏取代。在五期蓄水时,近坡面区域变形方向与前四期相反,说明蓄水水位抬升到地表(80 m)时,孔隙水压力对坡体表面挤压作用更大,导致坡体产生斜向下的变形,水平累积变形量减小。近地表区域累积竖直变形与地表沉降相近^[12]。坡体内部互层区域水平累计变形大于竖直变形,该区域主要沿褐色页岩弱层水平滑移。坡体内部断层破碎带F1及断层F4附近竖直变形大于水平变形,说明该区域主要发生沉降变形。各观测点的累积变形量见表2。

部分开挖、蓄水观测点位移矢量图见图8。由图8(a)可知,开挖以来,边坡整体都有不同程度的变形,变形方向朝向边坡外部,初期变化量较小随后越来越大。近坡面各个观测点的水平变形一般为0.04~0.06 mm,远大于坡体内部。近坡面区域的水平、竖直变形最大,受开挖影响最大,这是因为开挖导致的坡角增大,从而产生较大的变形。断层附近区域变形最小,该区域距离开挖坡面较远,受开挖卸荷影响最小。在第一、第二次开挖时,下方区域模型受自重力和断层破碎带上方倾倒模型自重力的作用,发生了较大变形,主要影响位于近坡面至坡体内断层附近的区域^[19]。第三次开挖时,上盘倾倒的岩体受自重力的作用,在沿弱层面上产生错动,但断层并不是整体移动。与上盘岩体相比,下盘区垂直位移大,并发生整体的错动下滑,主要影响坡体表面至坡体内断层附近的区域。

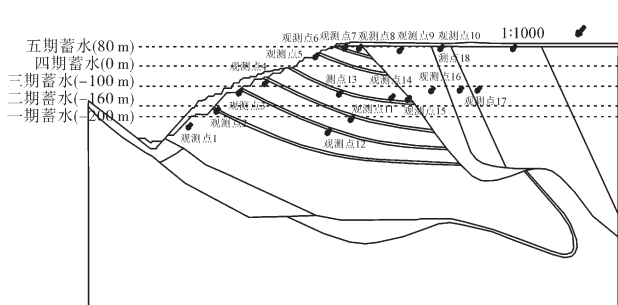
从图8(b)可知,近坡面区域水平及竖直累计变形最大。蓄水水位太深导致静水压力对坡体表面产生向右下的推挤作用,使坡体内应力减小而发生变形。在蓄水期间,各观测点均有一定变形迹象,变形主要集中在近坡面区域。具体而言,水位以下部分坡体由于浮托减重产生滑移,同时流动水流产生向右下的推挤作用,使得坡体内部的自应力不断调整。受蓄水影响的主要区域位于

边坡表面至坡体断层附近,各观测点的应力均呈增长趋势,但增长幅度越来越小,如图6、图7所

示,65 h后,各观测点的变形均保持稳定。



(a) 第三次开挖时观测点的位移矢量图



(b) 五期蓄水时观测点的位移矢量图

图8 部分开挖、蓄水观测点位移矢量图

Fig.8 vector diagram of displacement of partial excavation and water storage observation points

2.4 蓄水时边坡孔隙压力响应

试验中各监测点土压力变化分布情况特征见图9。由图9可见,监测点T1、T2、T3、T4在水位开始上升时,土压力出现减小现象,与之对应的相同时间点为孔压上升阶段。这是因为随水位的上升,坡脚部位干燥状态的岩体被水浸没,水位线下方岩体受到浮托力,随着水对坡体的渗透,坡脚部位孔隙水压力增大,使坡脚部位的有效应力降低。从各监测点土压力分布来看,坡体内土压力为0.34~6.88 MPa。位于坡体较低高程的监测点T1、T2和位于坡体较深部位的监测点T5、T6、T7的土压力较大,监测点T7处的土压力最大,为6.88 MPa,监测点T4处的孔隙压力最小,为0.34 MPa,说明在蓄水作用下,坡脚受到的压力最大,这是由于岩体支撑上部岩体,存在应力集中现象。坡脚岩体的应力随着蓄水释放,上部岩体失去支撑,临空条件改善,应力集中部位逐步由低处岩石向高处岩体转移。坡体内部应力在215 d左右稳定,稍慢于孔隙水压力稳定状态^[20]。

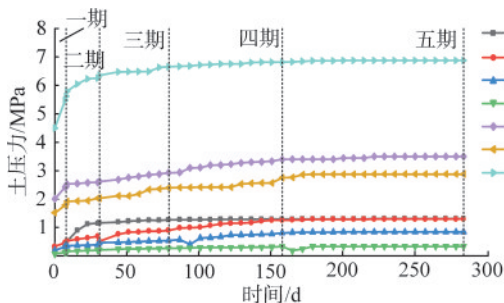


图9 蓄水时土压力变化规律

Fig.9 variation of earth pressure during water storage

本次蓄水试验时间相似比为1:31.6,位移相似比为1:1000,应力相似比为1:1300,各监测点孔压变化见图10。

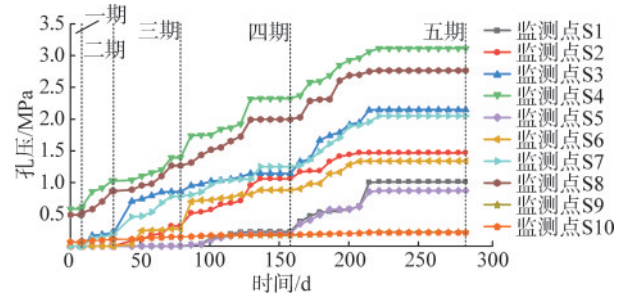


图10 蓄水时孔压变化规律

Fig.10 variation of pore pressure during impoundment

随着蓄水阶段的变化,各监测点孔压均产生较大变化,且基本同步。位于坡体深部的监测点稍有滞后,呈现阶梯状特征。各观测点孔压的变化顺序符合从坡表到坡体深部,从下至上先后变化的规律。在蓄水时,监测点S4产生的孔压最大,其次为监测点S8,监测点S10最小。孔压稳定值符合由低高程到高高程,由坡表到坡体内部内部逐渐减小的趋势。

一期蓄水阶段(0~8 d):蓄水水位抬升到-200 m,监测点S4、S8、S9、S10按照先后顺序逐渐增大且保持稳定,位于坡脚附近的监测点S4孔隙水压力最先上升,一期水位高程附近的监测点S8、S9、S10也逐渐上升,监测点S4的稳定孔压最大,监测点S8、S10次之,监测点S9最小,符合孔隙水流动趋势。

二期蓄水阶段(9~31 d):蓄水水位抬升到-160 m,位于边坡最低高程的监测点S4、S8孔压的响应增长经过一段时间接近稳定,监测点S3、

S7、S9、S10孔压的响应稍稍滞后于监测点S4、S8,且增长幅度很小,一段时间后稳定。

三期蓄水阶段(32~79 d):蓄水水位抬升到-100 m,此时原本处于相对稳定状态的监测点S4、S8、S9、S10的孔压再次增大,监测点S3、S7的孔压也继续增加,且涨幅大于二期蓄水时的响应。由于水位超过埋置高度,监测点S2、S6的孔压出现小幅增长。各监测点数据都在一段时间后基本保持稳定。

四期蓄水阶段(80~158 d):蓄水水位抬升至0 m,原本处于相对稳定状态的监测点S3、S4、S7、S8、S9、S10的孔压再次增大,坡体中部监测点S2、S6孔压也继续增加且涨幅大于三期蓄水时的响应。由于水位超过埋置高度,监测点S1、S5的孔压出现小幅增长。

五期蓄水阶段(159~285 d):蓄水水位抬升到地表处(80 m),监测点S2、S3、S4、S6、S7、S8、S9、S10孔压再次增大,坡体中部的监测点S1、S5孔压也继续增加且涨幅大于四期蓄水时的响应。在此蓄水阶段,监测点S4的最后稳定孔压最大,为3.11 MPa,这是因为该区域距离坡体表面最近,应力变化最大。监测点S10测点处最小,为0.21 MPa,这是因为该点距离坡体表面最远,应力变化最小。说明越向坡体内部延伸,孔隙水压力越来越小,最终在213 d左右各点孔隙水压力达到稳定状态。

2.5 蓄水时边坡沉降量变化分析

对五期蓄水试验数据进行整理,得到边坡最终累计变形量见图11,可知蓄水试验中地表统一下降。本次蓄水试验,几何相似比为1:1 000,时间相似比为1:31.6,根据相似比可以得地质原型五期蓄水后地表最终沉降量(见表2)。

由于监测点W1~W3分别在三期、四期、五期蓄水试验前去除,所以这些观测点的数值不能表示最终变形。位于坡顶处的监测点W4累计沉降量最大为0.041 2 m,由于蓄水水位的抬升,坡体表面受到的静水压力增大,坡体内部应力重分布,最后在静水压力和动水压力共同作用下,坡顶发生沉降变形。监测点W5、W6、W7距离坡体表面依次增加,这三处坡体沉降量分别为0.0296 m、0.0278 m、0.0249 m。可以看出坡体表面变形远大于坡体内部变形,远离坡面处变形量亦明显减小。

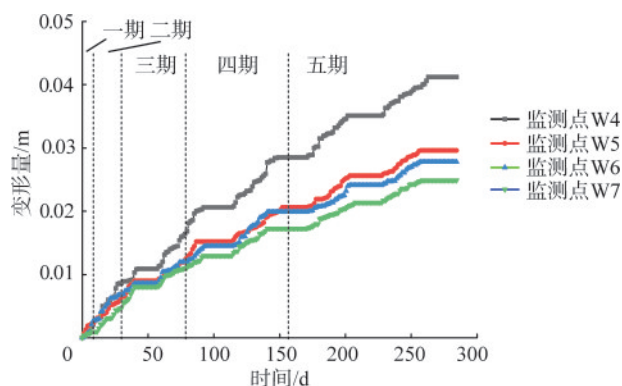


图11 蓄水模拟实验累计沉降变化

Fig.11 cumulative settlement variation curve of water storage simulation experiment

2.6 边坡稳定系数随蓄水高度变化规律

边坡稳定系数随蓄水高度变化见表3。由表3可见,蓄水初期,边坡角岩土被水软化,其力学参数降低;蓄水至-100 m过程中,边坡整体稳定系数逐渐降低;蓄水至0 m左右时,水压对边坡起到压脚作用,其稳定系数所上升;蓄水至80 m时,边坡稳定系数进一步降低,与相似模拟结果基本吻合。

表3 边坡稳定系数随蓄水高度变化规律

Tab.3 variation of slope stability coefficient with impoundment height

蓄水标高/m	稳定系数 F
未蓄水	1.235
-200	1.178
-160	1.121
-100	1.089
0	1.113
80	1.061

3 结论

本文基于边坡工程地质条件的分析,根据相似原理与相似准则,开展了复合开采边坡体开挖、蓄水模拟实验。研究开挖扰动、蓄水的作用下边坡体及断层构造带变形、破坏特征及其规律,并依照相似常数还原边坡的变形、破坏情况,得出如下结论。

(1) 开挖引起边坡应力释放,边坡岩体产生卸载变形,局部边坡岩体向坡体外部变形,且主要集中在近坡面中下部附近。主要由于岩体的开挖卸荷引起边坡岩体应力重新分布,近坡面应力变化较大,且在坡脚处应力局部集中所致。由物理模型模拟还原推测原型坡体卸荷变形可知,坡

体变形量一般为 0.15~0.39 m, 坡肩处卸荷变形量最大, 为 0.397 3 m, 坡顶处地表沉降最大可达 0.178 2 m。

(2) 在开挖作用下, 处于断层构造带范围内的岩体表现出非整体移动, 下盘岩体的垂直位移量较上盘岩体大, 说明该处岩体在开挖扰动及上盘岩体自重力的作用下存在沿断层破碎带产生相对错动的趋势。

(3) 蓄水初期, 水位线以下边坡坡体表面岩体受指向坡体内部动静水压力作用, 出现短暂的压密变形; 但随着水体向坡体内入渗, 坡体内部孔隙水压力随之增加, 加之水体对边坡岩体的浸泡软化, 边坡近坡面岩体逐渐向坡外变形, 且坡顶表现出一定的沉降趋势。由物理模型模拟还原推测原型坡体变形可知, 坡肩变形最大可达 0.031 2 m, 地表沉降可达 0.041 2 m。

参考文献(References):

- [1] 王东, 王艳婷, 李广贺, 等. 基于表面与深部位移相协同的滑坡分级预警方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 515-523.
WANG Dong, WANG Yanting, LI Guanghe, et al. Landslide classification warning method based on coordination of surface and deep displacement[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(5): 515-523.
- [2] WANG S H, ZHOU W, CAI Q X, et al. The coal mining model under slippery slope in Yiminhe open pit coal mines[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(5): 3727-3737.
- [3] 孙树海, 曹兰柱, 张立新. 露天矿边坡稳定性的模糊综合评判[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 177-179.
SUN Shuhai, CAO Lanzhu, ZHANG Lixin. Fuzzy comprehensive judgment method used in slope stability of strip mine[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(2): 177-179.
- [4] 苏占东, 王鸷文, 孙进忠, 等. 地质力学模型实验中变形量测方法的应用研究[J]. 地质论评, 2024, 70(1): 287-308.
SU Zhandong, WANG Zhiwen, SUN Jinzhong, et al. A review of the application of deformation measurement methods in geomechanical model experiments[J]. Geological Review, 2024, 70(1): 287-308.
- [5] LI L Q, JU N P. Effect of the inclined weak interlayers on the rainfall response of a bedded rock slope[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(9): 1663-1674.
- [6] WANG T, ZHAO H B, LIU Y H, et al. Formation mechanism and control measures of sliding surface about bedding slope containing weak interlayer[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(8): 2372-2381.
- [7] LI H R, DU H, BAI R C, et al. The failure mechanism and stability of the end slope of inclined composite coal seam[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 2830717.
- [8] DAI Z Y, ZHANG L, WANG Y L, et al. Deformation and failure response characteristics and stability analysis of bedding rock slope after underground adverse slope mining[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 4405-4422.
- [9] LUO P J, HAN X Q, CHEN N. Study on complexity planning model of pumped storage in abandoned open-pit mine: a case study of Fushun open-pit mine[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 808371.
- [10] ZHANG F, YANG T H, LI S H. Investigation on stability of large bedding slope affected by weak interlayer creep deformation[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2023, 27(2): 227-250.
- [11] LI S, ZHAO Z M, HU B Y, et al. Hazard classification and stability analysis of high and steep slopes from underground to open-pit mining[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(18): 11679.
- [12] WANG J M, ZHOU Z H, CHEN C, et al. Failure mechanism and stability analysis of an open-pit slope under excavation unloading conditions[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1109316.
- [13] 苏占东, 周思哲, 王成虎, 等. 工程岩体物理模拟研究中实验材料的选择与应用[J]. 地质论评, 2023, 69(3): 1133-1149.
SU Zhandong, ZHOU Sizhe, WANG Chenghu, et al. A review of the selection and application of experimental materials in the study of physical simulation of engineering rock masses[J]. Geological Review, 2023, 69(3): 1133-1149.
- [14] LU Y F, LIU G, CUI K, et al. Mechanism and stability analysis of deformation failure of a slope[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 8949846.
- [15] ZHOU J X, LI F, WANG J A, et al. Stability control of slopes in open-pit mines and resilience methods for disaster prevention in urban areas: a case study of Fushun west open pit mine[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 879387.
- [16] ZHONG S H, MIAO Y J. Research on the influence of weak interlayer in open-pit slope on stability[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 4256740.
- [17] DONG Z H, DING X L, HUANG S L, et al. Deformation response and anchorage control of excavation unloading of high and steep rock slope[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(4): 042010.
- [18] QU M L, DANG F N. Numerical analysis of instability mechanism of a high slope under excavation unloading and rainfall [J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 7990.
- [19] ZHANG L, HUANG S L, WU Y J, et al. Analysis of the deformation mechanism and stability of bedding soft rock slope [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 861(7): 072070.
- [20] LIN B X. Stability analysis of dump slope: taking Zijinshan open-pit mine as an example[J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022: 9009528.