

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.12

上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟

郑 达, 毛 峰, 王沁沅, 苏 杭, 李文龙

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 现有上硬下软边坡的研究大都集中在压缩挤出变形的近水平泥岩、页岩基座型边坡变形演化过程, 针对倾倒变形的板岩基座型边坡开挖响应研究甚少, 本文以西藏玉曲河某水电站厂址边坡为研究对象, 根据现场地质调查建立符合坡体实际情况的地质结构模型, 采用物理试验的方法模拟原型边坡开挖。通过试验揭示上硬下软反倾边坡在开挖条件下的变形响应特征及破坏模式。研究表明: (1) 开挖条件下上硬下软型边坡变形破坏过程分为 a) 下部软岩倾倒弯曲加剧; b) 软岩倾倒折断, 上部卸荷硬岩沿已有裂隙剪切; c) 倾倒软岩滑移, 卸荷硬岩剪断岩性分界部位, 折断面贯通 3 个阶段。其变形破坏模式为下部软岩倾倒—上部硬岩剪断组合滑移型破坏; (2) 开挖强倾倒区岩体会使下部软岩迅速失稳并促使上部硬岩剪切破坏; 开挖引起的反倾上硬下软边坡大变形在短时间内完成, 前期变形和能量积累是一个较长的过程; (3) 开挖时需避免对坡脚倾倒岩体“大开挖”施工。

关键词: 上硬下软; 倾倒变形; 卸荷变形; 物理模拟; 开挖响应; 边坡工程

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0089-07

Physical simulation of the excavation deformation response of counter-tilt slope with rigid layers on the soft

ZHENG Da, MAO Feng, WANG Qinyuan, SU Hang, LI Wenlong

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology),
Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Most of the existing researches on counter-tilt slope with rigid layers on the soft focus on the deformation evolution process of near-horizontal mudstone and shale pedestal type slopes with compression and extrusion deformation, and the excavation response of the slab-pedestal type slope with toppling deformation were seldom examined. This paper takes the slope of the Yuqu Hydropower Station in Tibet as the research object. Based on the field geological investigation, the geological structure model conforming to the actual situation of the slope is established, and the prototype slope excavation is simulated by using the physical test method. The deformation response characteristics and failure modes of counter-tilt slope with rigid layers on the soft under excavation conditions are revealed through experiments. The results show that (1) the process of deformation and failure of counter-tilt slope with rigid layers on the soft under excavation conditions is divided into three stages: (a) lower soft rock topping is intensified; (b) soft rock toppling fracture and the upper unloading hard rock along the existing crack shear; and (c) dumping soft rock slip, unloading hard rock shearing lithologic boundary points, break through the surface. The deformation failure mode is the lower soft rock toppling-upper hard rock shear-combination slip failure. (2) The large deformation caused by

收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFC1504905); 国家自然科学基金项目资助(41772317); 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题资助(SKLP2015Z015)

第一作者: 郑达(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害评价防治及高边坡稳定性教学与研究工作。E-mail: zhengda@cdut.cn

通讯作者: 毛峰(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地质工程。E-mail: 1044797582@qq.com

excavation of counter-tilt slope with rigid layers on the soft is completed in a short time, and the deformation and energy accumulation in the early stage is a long-time process. (3) During the excavation, it is necessary to avoid the “large excavation” construction of the rock mass toppling on the slope foot.

Keywords: rigid layers on the soft; toppling deformation; unloading deformation; physical simulation; evolution response; slope engineering

某水电站位于西藏玉曲河干流下游河段。水库正常蓄水位 2 815 m,总库容 $10.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,电站总装机量 1 005.2 MW。其厂址边坡为反倾“上硬下软”型岩质高边坡,具有边坡高陡、地应力高和坡体结构复杂等特点,由于边坡开挖引起的卸荷、倾倒变形响应十分复杂,严重制约水电站工程建设和运营安全。

目前对上硬下软边坡的研究主要集中在变形演化过程和失稳模式,且多采用数值计算和理论分析^[1-6],鲜有此类边坡开挖响应的研究。吴勇进等^[7]采用数值模拟研究了“下软上硬”型反倾边坡的变形演化,提出其变形破坏模式为倾倒-拉裂转为滑移-拉裂。Q. Zaruba^[8]发现近水平软弱基座型斜坡上部硬岩的拉裂破坏先发生于软硬岩交界面。毕芬芬^[9]运用多种方法对贵州关岭大寨滑坡进行了研究,提出了大寨滑坡的变形演化过程及失稳模式。张倬元等^[10]研究了倾坡内软弱基座斜坡陡崖,将其变形破坏分成卸荷回弹形成陡立裂缝、前缘塑流-拉裂变形和深部塑流-拉裂变形 3 个阶段。郑达等^[11]以贵州开阳磷矿崩塌为研究对象,结合数值模拟手段,阐明在地下开采用下“反倾上硬下软”型斜坡变形破坏的发展过程。黄润秋^[12]对溪口滑坡进行了分析,提出大型反倾岩质高边坡失稳模式为“挡墙溃决型”。

以往研究的上硬下软边坡基座岩体多为泥岩、页岩,而本次研究边坡下部板岩与上述软弱基座岩性存在差异。且下部板岩变形以倾倒弯曲为主,不同于以往软弱基座的压缩、挤出变形。

上述研究成果和手段为边坡开挖响应的研究提供了重要的参考,但类似在开挖条件下反倾上硬下软边坡变形演化目前尚没有较为合理有效的研究成果。因此本文以西藏某水电站厂址边坡为研究对象,通过物理试验的方法对反倾上硬下软边坡在开挖条件下的变形响应展开研究。

1 工程地质背景

1.1 边坡地质概况

本次研究的厂址边坡位于西藏玉曲河右岸,山脊走向近北东向。边坡坡高八百余米,地形坡度 $30^\circ \sim$

50° ,岩层倾向坡内,基岩倾角 $70^\circ \sim 85^\circ$,坡表岩体发生倾倒,倾角 $24^\circ \sim 50^\circ$,为典型的反倾岩质高边坡。上部基岩为 T_3wp^4 结晶灰岩、大理岩,下部基岩为 T_3wp^3 钙质板岩夹碳质板岩;上部硬岩区发育有陡倾坡内断层与两组裂隙(倾坡内、倾坡外),下部软岩区主要发育陡倾坡外断层和切层裂隙。边坡典型地质剖面图如图 1 所示。

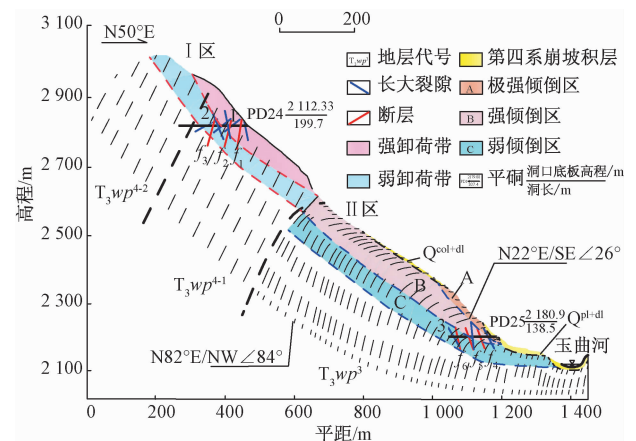


图 1 厂址边坡典型地质剖面图

Fig. 1 Typical geological profiles of slope after site

1.2 边坡变形破坏特征及分区

边坡在结构上呈“上硬下软”组合,在变形上显现出复杂的特征,下部软岩发育倾倒变形,上部硬岩发育卸荷变形。

1.2.1 倾倒变形

倾倒变形主要发育于边坡下部板岩区。河谷揭露的下部正常板岩呈薄层状,陡倾坡内(图 2a),产状为 $N22^\circ E/NW \angle 74^\circ$ 。厂址区 II 级阶地揭露的近水平薄层板岩层面倾倒弯曲迹象明显,产状 $N29^\circ E/NW \angle 18^\circ$ (图 2b),拉张裂缝发育,张开 2 ~ 3 cm,个别填充岩屑,岩体呈碎裂状。

1.2.2 卸荷变形

厂址边坡卸荷-拉张变形发育于高程 2 600 m 以上大理岩、灰岩区的山脊部位,以 3# ~ 7#梁顶部及陡缓交界处最为发育。具体分为拉张型卸荷带和剪切松弛型卸荷带,如图 3 所示。

1.2.3 岩体工程地质分区(类)

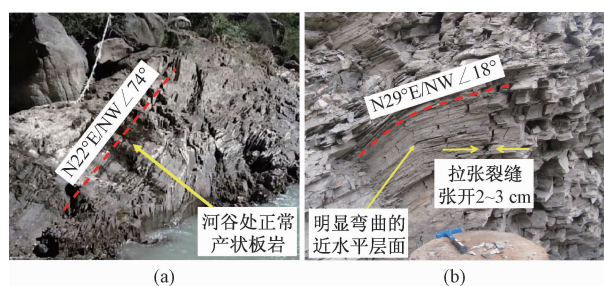


图2 下部板岩倾倒弯曲变形

Fig. 2 Toppling deformation of lower slab rock

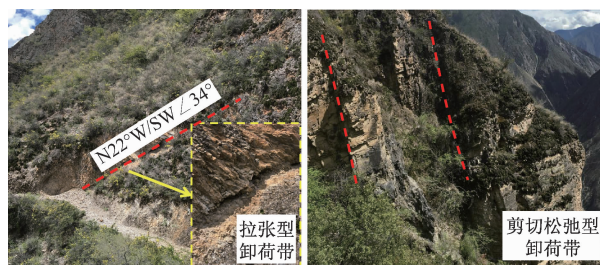


图3 上部硬岩坡表卸荷变形

Fig. 3 Unloading fissure of upper hard rock slope

通过平硐手段对厂址边坡坡内变形现象及岩体结构进行调查,PD24平硐揭露,边坡高程2 800 m附近大理岩与灰岩发育卸荷拉张变形。硐深80 m处为强卸荷带岩体质量分界处,79.6 m前岩体较破碎,裂隙张开宽度约3~5 cm,79.6 m之后,除172~185 m发现卸荷带外,其余部分岩体质量良好。PD25平硐揭露,边坡高程2 160 m附近薄层板岩发育倾倒变形。硐深0~22 m岩体发生极强烈倾倒折断,岩层倾角 21° ~ 33° ,层内拉张量 ≥ 20 mm,呈散体-坠覆结构;22~69 m岩体发生强烈倾倒,岩层倾角 36° ~ 43° ,层内拉张量5~24 mm,呈碎裂-拉张结构;69 m之后,岩层倾角 39° ~ 64° ,层内拉张量2~5 mm,整体呈层状结构。

综上,将整个研究区分为两个区域:卸荷变形区(I区)和倾倒变形区(II区)。同时划分I区和II区的卸荷及倾倒范围,结果如下,PD24平硐0~79.6 m为强卸荷带,79.6~185 m为弱卸荷带;PD25平硐0~22 m为极强倾倒变形区(A区),22~69 m为强倾倒区(B区),69 m以后为弱倾倒区(C区)(图1)。

2 边坡开挖变形响应试验研究

2.1 模型设计方案

2.1.1 模型设计

试验模型在还原边坡实际地质状况时作适当简化,将边坡划分为软岩极强倾倒区(A)、软岩强倾倒区

(B)、软岩弱倾倒区(C)及软岩基岩区(D)、硬岩卸荷区(E)、硬岩未卸荷区(F)。对下部软岩,设置正常岩体区(D)倾角为 72° ,各倾倒区(C、B、A)倾角分别为 60° 、 45° 和 30° ,通过改变岩板倾角、各区岩板强度及节理面发育规模来模拟下部软岩的倾倒变形行为。对上部硬岩,仅设卸荷区与未卸荷区,且忽略大理岩与灰岩岩性差异,选取较厚岩板模拟上部硬岩。另根据上部硬岩的卸荷情况设置3条卸荷裂隙(LX1、LX2、LX3),其中LX1、LX2为中缓倾角裂隙,倾坡外,倾角 45° ,LX1布置于近岩性交界处,LX2布置于硬岩中部区域。LX3为陡倾角裂隙,倾坡外,倾角 75° ,布置于坡顶。概化后边坡模型如图4所示。

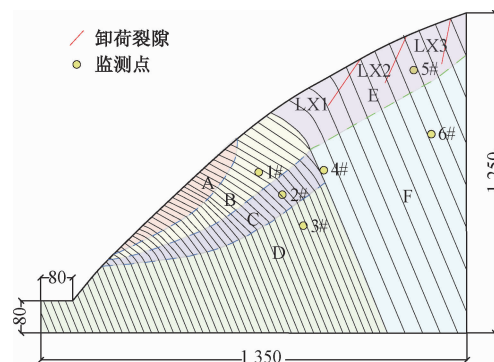


图4 边坡模型设计图(单位:mm)

Fig. 4 Diagram showing the slope model design (mm)

模型设计时考虑位移边界条件及初始条件。开挖为边坡变形提供了有利临空条件,坡表附近岩体向临空面的弯曲变形不受约束,视为自由边界;而变形末端岩层嵌固在围岩中,变形及位移微乎其微,将坡体后缘及底部视为固定边界。试验模拟自然条件下上硬下软反倾边坡开挖的变形响应,初始条件设定为模拟自身重力,不施加应力。

根据坡体结构与变形特征在模型不同部位共设6个监测点,1#、2#、3#监测点分别布置于软岩强倾倒区、弱倾倒区与基岩区,4#监测点布置于岩交界处中上部,5#、6#监测点分别布置于硬岩卸荷区与硬岩未卸荷区。每个监测点布置1只LY-350微型土压力盒,平行层面安装,受压面朝向岩层面外法线方向,监测传感器上部压力变化;1只ZYJ1-WBD-50B百分表式位移计监测该点Y方向(垂直)位移变化。通过连接泰斯特TST3822E静态应变仪采集数据。

2.1.2 相似条件

本次试验以厂址边坡为原型建立二维框架物理开挖模型,原型边坡研究范围约长900 m,高800 m,实验

装置为镀锌刚结构框架模型箱,长 1.5 m,宽 0.4 m,高 1.3 m,综合考虑后选取(几何相似常数)=650,根据本边坡模拟范围与几何相似比确定模型尺寸,坡高 1.23 m,坡长 1.38 m。选取板岩、大理岩和灰岩的(容重相似常数)=1.1,根据地质力学模型试验应满足的相似判据^[13]得(弹性模量相似常数)=715,(抗拉强度相似常数)=715,(黏聚力相似常数)=715,(内摩擦角相似常数)=1。经现场、室内试验和相似比,得到原型与模型物理力学参数,如表 1 所示。

表 1 边坡原型和模型物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of prototype slope and its models

区号	岩性及分区	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	抗拉强度/ MPa
A	极强倾倒	2 080/1 891	1 500/2.09	0.85/0.0012
B	强倾倒	2 450/2 227	2 600/3.64	1.05/0.0015
C	弱倾倒	2 630/2 391	4 000/5.60	1.25/0.0017
D	基岩	2 700/2 454	6 500/9.10	1.75/0.0024
E	大理岩、卸荷	2 160/1 964	6 800/9.51	4.00/0.0056
F	灰岩 基岩	2 750/2 500	11 200/15.66	7.50/0.010

注:上表中数值为原型/模型

2.1.3 相似材料

相似材料选择参考前人研究成果^[14],选用重晶石、石英砂、水泥、环氧树脂、聚酰胺、酒精为岩石及层间黏结相似材料的基本原料。采用正交试验方法^[15],通过 15 组试验,最终确定各区岩体相似材料配比,如表 2 所示。

表 2 模型材料配比

Table 2 Proportion of model materials

区号	材料及质量百分数					
	重晶石	石英砂	环氧树脂	聚酰胺	酒精	水泥
A	60.52	25.98	0.21	0.21	13.13	0.46
B	60.37	25.82	0.20	0.20	12.62	0.79
C	60.44	25.96	0.24	0.24	12.16	0.96
D	60.58	25.97	0.35	0.35	11.30	1.00
E	60.38	26.01	0.31	0.31	12.19	0.79
F	60.51	26.52	0.39	0.39	11.18	1.11

本次试验为还原结构面实际接触情况,模拟试块间及层面间黏结强度,选取内聚力 C 及内摩擦角 φ 作为相似指标。层间黏结相似材料选取石英砂、水和石膏,各原料比例为 3:1:2,通过多组摩擦试验^[16],确定黏结强度配比。各层(带)间黏结材料用量如表 3 所示。表 3 中, C 为层面, L_{JQ} 为极强-强倾倒分界, L_Q 为强-弱倾倒分界, L_R 为弱倾倒-基岩分界, L_X 为卸荷裂隙。

表 3 各层(带)间黏结材料用量

Table 3 Amount of bonding material between each layer

结构面	C	L_{JQ}	L_Q	L_R	L_X
摩擦系数	0.42	0.43	0.80	0.82	0.37
用量/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	0.3	0.3	1.5	1.6	0.2

2.2 开挖设计方案

开挖方案设计在保证厂房建设可利用空间基础上,分 3 次开挖(图 5)。由于下部软岩极强倾倒区岩体质量极差,一级开挖优先清除极强倾倒区岩体;二、三级开挖清除强倾倒、弱倾倒及部分正常岩体。考虑空间需求,一级开挖坡比为 1:0.48,高度 150 mm,开挖线沿极强倾倒区底界;二、三级开挖坡比均为 1:1,高度 175 mm,开挖线基本平行坡面线。在此基础上,为研究“大开挖”对边坡稳定性影响,增加 2 条开挖线,坡比为 1:0.48,高度 175 mm。

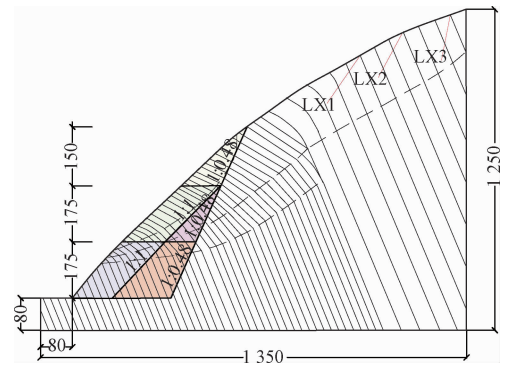


图 5 边坡开挖方案设计(单位:mm)

Fig. 5 Design of slope excavation scheme (mm)

2.3 试验过程及现象

边坡历经 5 级开挖后的形态变化如图 6 所示。第一级开挖历时 10 min,开挖区域为极强倾倒区上半部岩体和少量强倾倒区岩体,使用手持切割机沿极强倾倒区底界进行开挖。一级开挖后,强倾倒区顶部岩体在开挖扰动下发生小幅度位移,层面略微张开(图 6a)。一级开挖 2 h 后进行第二级开挖,历时 20 min,开挖区域为剩余极强倾倒区岩体及强倾倒区下部岩体。二级开挖后,强倾倒底界以上岩体向下弯折变形,层间大幅张开,硬岩区形成约 2 cm 的张拉裂缝,强倾倒底界处形成约 1 cm 的剪切裂缝。硬岩区坡表岩体沿 LX1 发生小幅度滑移变形(图 6b)。

二级开挖 4 h 后进行第三级开挖,历时 50 min,开挖区域为强倾倒区、弱倾倒区及部分正常岩体。三级开挖后,临空面加大,前缘岩板不断倾倒,后缘层间产生拉张现象;弱倾倒底边界裂隙贯通,形成类似于锯齿

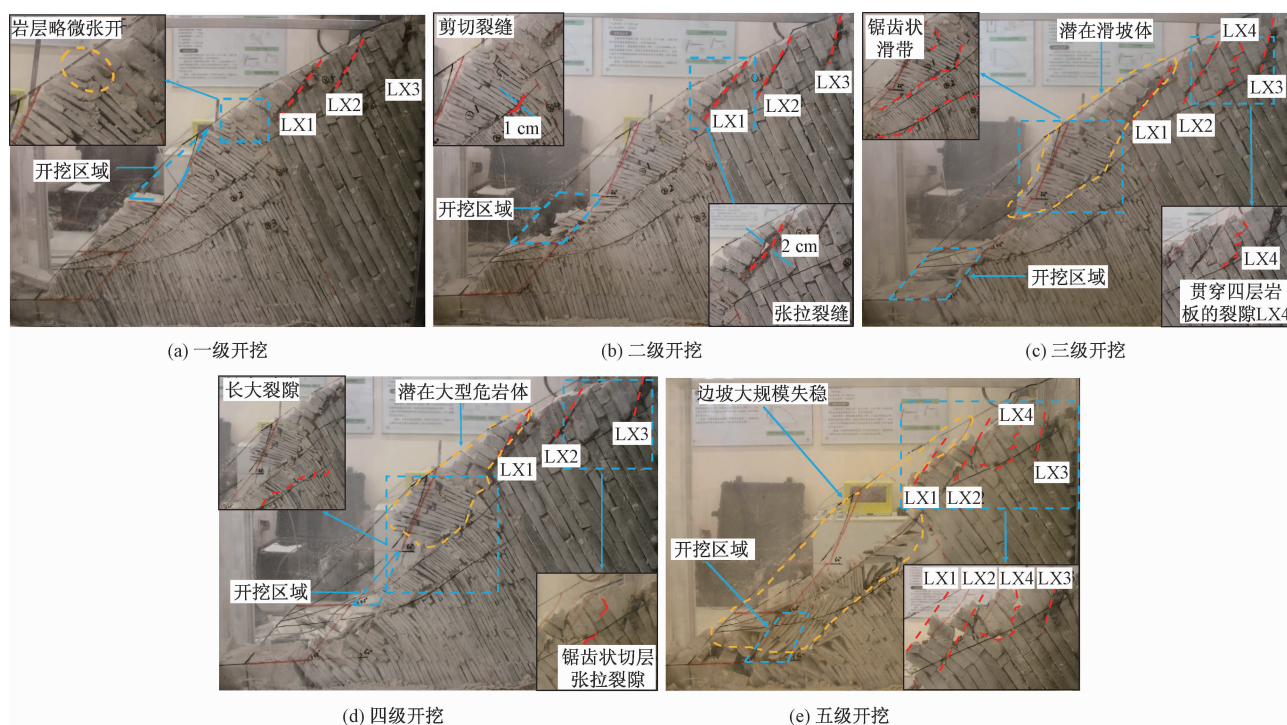


图6 5级开挖后模型边坡形态

Fig. 6 Shape of the model slope after five stage excavations

状滑带。硬岩区形成一长度约 10 cm, 贯穿四层岩板的裂隙 LX4; 上部硬岩沿 LX1 滑动, 最终突破分界处, 与下部强倾倒区岩体形成潜在的滑坡体(图 6c)。

三级开挖 5 h 后进行第四级开挖, 历时 10 min, 开挖区域为小部分强倾倒区、弱倾倒区岩体。四级开挖后, 强倾倒区中下部岩体沿强倾倒区底边界滑出, 剩余强倾倒区岩体与上部含 LX1 的硬质岩区形成潜在大型危岩体。弱倾倒区岩体层间进一步张开, 形成断续贯通的长大裂隙; 坡体后缘出现锯齿状切层张拉裂隙(图 6d)。

四级开挖 1 h 后进行第五级开挖, 历时 20 min, 开挖区域为小部分正常岩体, 并清除前期垮塌掉落的岩体。五级开挖后, 弱倾倒区岩体迅速失稳, 沿前期形成的滑动带发生滑移, 同时带动上部强倾倒区岩体滑塌, 坡体后缘 LX1 上部硬岩随之滑落, 边坡发生大规模失稳(图 6e)。

2.4 试验现象分析

(1) 开挖过程中边坡变形破坏特征: 可分成 3 个阶段: (a) 边坡经历了一、二级开挖, 下部软岩向临空方向加剧倾倒弯曲; (b) 三级开挖后, 软岩变形由“倾倒弯曲”转变为“倾倒折断”, 上部硬岩沿 LX1 剪切, 形成一贯通卸荷硬岩区的裂隙 LX4; (c) 四、五级开挖后, 下部倾倒软岩沿弱倾倒区底边界滑移, 同时上部卸荷硬岩剪断岩性分界部位, 折断面贯通, 边坡产生大规模失稳。

(2) 2 种开挖方案的对比: 开挖少量极强、强倾倒

岩体时, 仅开挖面附近岩体发生变形, 边坡基本稳定; 开挖极强、强、弱、正常岩体, 当上部卸荷硬岩变形产生的剪切力突破了岩性分界处岩体的抗剪强度时, 会导致下部倾倒岩体滑移与上部卸荷岩体剪断的组合变形, 边坡失稳。因此, 此类边坡在开挖时, 应避免坡脚倾倒岩体“大开挖”, 为抑制下部软岩的再次倾倒及上部硬岩的剪切变形, 有效的安全措施为开挖面锚固与及中部岩性分界部位岩体置换。

2.5 试验结果分析

2.5.1 模型边坡位移特征分析

以一、二、三级边坡开挖为例(图 7)。边坡一级开挖各监测点位移曲线如图 7a 所示。边坡开挖初期 1#~5#监测点均存在位移突变, 6#点处在硬岩未卸荷区, 底部小开挖未对其造成明显影响, 位移变化不明显; 坡顶位置(5#点)及软岩强倾倒区(1#)位移最大, 分别达 4.5 mm 和 3.5 mm, 开挖改善了临空条件, 促使临空面附近软岩倾倒, 进而上部硬岩出现拉裂缝, 产生较大位移; 软岩弱倾倒区(2#)、软岩基岩区(3#)、岩性交界(4#)在开挖结束后基本保持稳定, 但由于上部坡体压力使内部裂隙逐渐闭合, 仍产生较小位移。

二级开挖各监测点位移曲线如图 7b 所示。此次开挖后, 强倾倒区(1#)产生较大位移, 二级开挖加大了临空面, 开挖面附近软岩倾倒变形加剧, 弱倾倒区

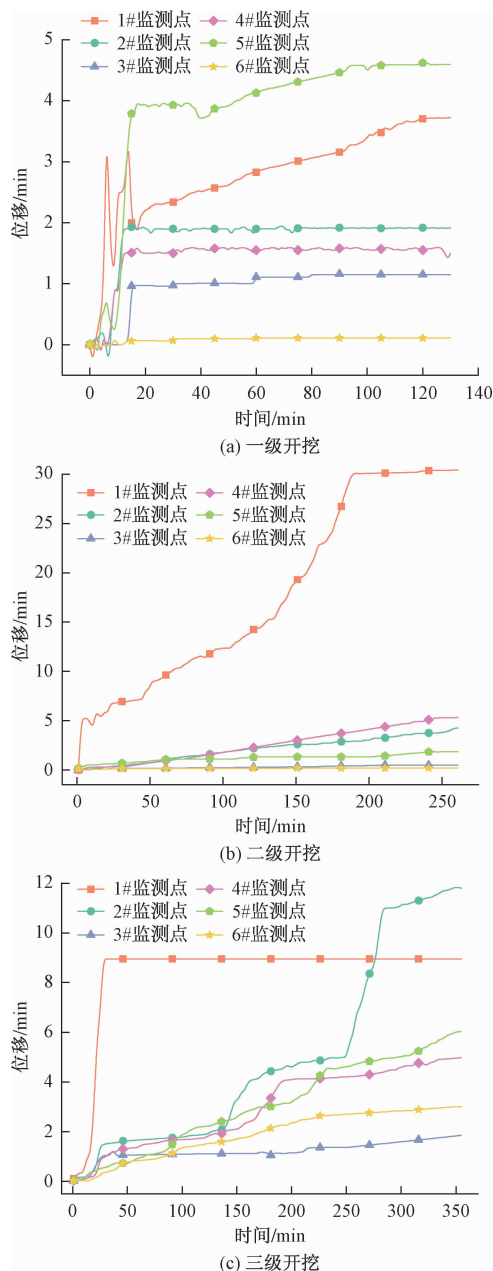


图7 一、二、三级开挖模型边坡监测点位移变化

Fig. 7 Displacement change of the monitoring point of the first, second and third stage excavation model slope

(2#)、岩性交界(4#)和坡顶位置(5#)位移较小,曲线平缓,推测其变形仍为内部裂隙闭合所致;强倾倒区(1#)位移曲线呈先缓后陡,开挖 200 min 后达 32 mm,体现开挖刚结束时强倾倒区岩体为倾倒弯曲变形,接着突破带间黏结材料抗剪强度,转变为倾倒折断大变形。

边坡三级开挖各监测点位移曲线如图 7c 所示。数据分析得出,2#~6#各点位移曲线均上升,说明在第三级开挖后边坡各部位均发生明显位移,其中强倾倒

区(2#)变形最剧烈,位移达 12 mm。位移曲线在 20 min、150 min、250 min 产生突变,说明边坡发生大变形往往是瞬时或在短时间内完成的,但前期变形或能量的积累是一个较长的过程。岩性分界(4#)与坡顶位置(5#)位移曲线走势虽相似,变形量值也相近,但岩性分界(4#)位移突变总先于坡顶位置(5#),说明在开挖坡脚条件下,变形从下部软岩开始,并不是立即传递给上部硬岩,需先突破岩性分界处岩体,进而将变形传递。软岩基岩区(3#)和硬岩未卸荷区(6#)位移变化较小,体现本次开挖对正常岩体的影响很小,主要还是已变形区域岩体的进一步变形。强倾倒区(1#)位移计在开挖前已超过量程,因此其数据不再分析。

2.5.2 模型边坡压力特征分析

试验中各监测点的岩体压力数据如图 8 所示。除 1#、4#传感器在第五次开挖后因超过量程和脱落产生明显不正常数据外,其余时间都正常。

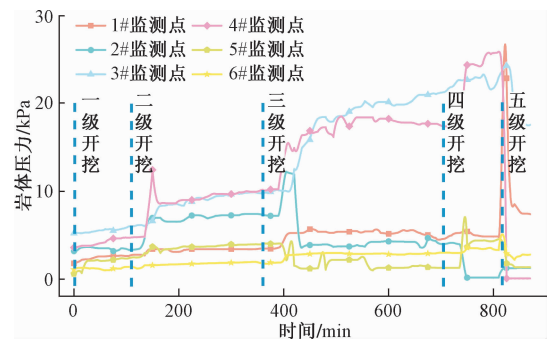


图8 试验过程中各监测点压力变化

Fig. 8 Pressure change of each monitoring point during the test

由图 8 分析可得,各点的土压力随开挖的进行(第一次至第四次)逐渐增大,说明坡体压力随边坡变形破裂的发展而增加,且增加幅度基本能与开挖活动相呼应。除一级开挖外,土压力随各级开挖呈现实时或延后的突变,这是由于边坡变形前期需要积累较长时间能量。待开挖后模型静置一段时间,土压力曲线基本保持稳定,体现边坡在适应新的应力状态后,会趋于暂态稳定状态。

观察土压力量值分布,发现软岩基岩区(3#)、岩性分界(4#)所受压力最大,峰值约 25 kPa,软岩强倾倒区(1#)、软岩弱倾倒区(2#)次之,约 5 kPa 左右,硬岩卸荷区(5#)、硬岩未卸荷区(6#)所受压力最小,峰值约 3 kPa,说明边坡下部软岩在开挖后,临空条件较好,上部硬岩即发生卸荷,挤压下部软岩,上部硬岩所受压力最小,下部临空面周围软岩压力稍大。软岩基岩区由于高程低且水平深度大,受到岩体压力偏大。

2.6 对比分析结论

对比分析试验中位移与压力数据,可以得到:

(1)一级开挖时,边坡未发生大变形,说明清除极强倾倒区岩体对边坡稳定性影响较小;但后续开挖导致边坡变形加剧并发展失稳,说明开挖强倾倒区岩体会使下部软岩强倾倒区迅速失稳并促使上部卸荷硬岩剪切破坏。

(2)边坡在发生大变形之前,处于暂态稳定状态,会有较长时间的小变形和能量积累,而后产生瞬时大变形。

(3)随开挖进行,边坡内部变形发展,各部位压力逐级增大;低高程且深度大的岩体所受压力大。

2.7 讨论

本试验研究得出的开挖条件下反倾上硬下软型边坡的变形特征适用于相同或相似结构的边坡,对此类边坡开挖也有参考价值。但模型设计存在不足:(1)采用层状岩板模拟实际上多为块状构造的大理岩;(2)倾倒分区界面设置过于理想,若界面起伏分布,变形破坏模式则可能产生差异。故如何更好地模拟岩土体性质及倾倒界面的物理力学性质,还原坡体结构特征,还有待后续完善研究。

3 结论

(1)开挖条件下上硬下软型边坡变形破坏过程可分为3阶段:下部软岩倾倒弯曲加剧;软岩倾倒折断,上部卸荷硬岩沿已有裂隙剪切;倾倒软岩滑移,卸荷硬岩剪断岩性分界部位,折断面贯通。其破坏模式为下部软岩倾倒-上部硬岩剪断的组合滑移破坏。

(2)清除极强倾倒区岩体对边坡稳定性影响较小,但开挖强倾倒区岩体会使下部软岩迅速失稳并促使上部硬岩剪切破坏;边坡的大变形在短时间内完成,但前期变形或能量积累是一个较长的过程。坡体内部压力随边坡变形破裂的发展而增大;高程低、水平深度大的部位岩体压力大。

(3)上硬下软边坡开挖时需避免对坡脚倾倒岩体“大开挖”施工。

参考文献:

- [1] 任光明,宋彦辉,聂德新,等. 软弱基座型斜坡变形破坏过程研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(9):1510-1513. [REN G M, SONG Y H, NIE D X, *et al.* Study on deformation and failure process of soft base slope [J]. Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2003, 22 (9): 1510 - 1513. (in Chinese)]

- [2] LECHMAN J B, GRIFFITHS D V. Analysis of the progression of failure of earth slopes by finite elements [J]. GSP, 2000, (101):250-265.
- [3] MATSUKURA Y. Cliff instability in pumice flow deposits due to notch formation on the Asama Mountain slope, Japan [J]. ZFG, 1988, 32: 129-141.
- [4] 陈小婷,黄波林,刘广宁,等. 三峡库区平缓层状软硬相间斜坡变形模式变化分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(2):57-61. [CHEN X T, HUANG B L, LIU G N, *et al.* Analysing on deforming mode transforming of gentle soft-and interbed slopes in three gorges reservoir [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(2):57-61. (in Chinese)]
- [5] 谭儒蛟,胡瑞林,徐文杰,等. 虎跳峡龙蟠右岸斜坡变形的地质力学机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (增刊2):5674-5679. [TAN R J, HU R L, XU W J, *et al.* Discussion on the mechanics mechanism of the slope deformation on the right Bank of the Dragon Pan in the tiger Leaping Gorge [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (Sup 2):5674-5679. (in Chinese)]
- [6] 余业. 反倾岩质滑坡成因机制及动力响应研究[D]. 成都:成都理工大学, 2011. [YU Y. Research on formation mechanism and dynamic response of counter-tilt rock slopes [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese)]
- [7] 吴勇进,张练,张雨霆. “下软上硬”二元结构型反倾边坡倾倒变形演化机理研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(10):133-136. [WU Y J, ZHANG L, ZHANG Y T. Study on toppling deformation evolution mechanism of anti-dip slope with ‘lower soft and upper hard’ dualistic structure [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(10):133-136. (in Chinese)]
- [8] ZARUBA Q MENCL V. Engineering geology [M]. Amsterdam: Elsevier Publishers, 1976.
- [9] 毕芬芬. 中缓倾内上硬下软型边坡失稳机理物理模拟研究[D]. 成都:成都理工大学, 2013. [BI F F. Physical simulation study on the formation mechanism of a medium low-angle and counter-tilt slope with rigid layers on the soft [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese)]

(下转第112页)

- 用力的室外拉拔试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 64 - 69. [WANG G R, HU S H, ZHANG Y J, *et al.* An outdoor drawing test study of the root soil interaction force for a small tree root system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 64 - 69. (in Chinese)]
- [14] 冯国建, 沈凡, 王世通. 护坡植物根系分布特征及抗拉强度研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2013, 30(2): 115 - 118. [FENG G J, SHEN F, WANG S T. Study on distribution characteristic and tensile strength of slope eco-engineering plant root [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2013, 30(2): 115 - 118. (in Chinese)]
- [15] 陆桂红, 欧国强, 杨顺, 等. 泥石流源区典型草本植物根系抗拉试验[J]. 山地学报, 2014, 32(6): 725 - 731. [LU G H, OU G Q, YANG S, *et al.* Root tensile test of typical grass in debris flow triggering area [J]. Mountain Research, 2014, 32(6): 725 - 731. (in Chinese)]
- [16] 王晓梅, 陈建平, 周云艳. 植物根系抗拉试验研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15688 - 15691. [WANG X M, CHEN J P, ZHOU Y Y. Study on tensile test of plant roots [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(32): 15688 - 15691. (in Chinese)]
- [17] 王恒星, 杨林. 冻融作用下草本植物根系加固土体试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 792 - 801. [WANG H X, YANG L. Experimental study on the reinforcement of herbaceous plant roots under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 792 - 801. (in Chinese)]
- [18] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 144 - 152. [LI J X, HE B H, S Y, *et al.* Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 144 - 152. (in Chinese)]
- [19] MATTEW R, DURLAO, SOPHIE, *et al.* The role of root development of Avena fatua in conferring soil strength[J]. American Journal of Botany, 2015, 102(7): 150 - 160.

编辑: 张明霞

(上接第 95 页)

- [10] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2009. [ZHANG Z Y, WANG S T, WANG L S, *et al.* Principles of engineering geological analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [11] 郑达, 黄润秋, 黄刚. 地下开采作用下“反倾上硬下软”型斜坡崩塌形成机制研究——以贵州开阳磷矿崩塌为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(3): 464 - 473. [ZHENG D, HUANG R Q, HUANG G. Mechanism of rockfall with anti-dip and top hard-bottom soft rock by underground mining: a case study of rockfall in Kaiyang phosphorite, Guizhou [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 464 - 473. (in Chinese)]
- [12] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. [HUANG R Q. Large landslide and its occurrence mechanism in China since 20th century [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454. (in Chinese)]
- [13] 左保成. 反倾岩质边坡破坏机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004. [ZUO B C. Study on losing stability mechanics of counter-tilt rock slopes[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of sciences, 2004. (in Chinese)]
- [14] 李兵. 岩石相似材料的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. [LI B. Experimental study on rock-like materials [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)]
- [15] 李志斌, 叶观宝, 徐超. 水泥土添加剂室内配比试验的模糊正交分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4): 117 - 119. [LI Z B, YE G B, XU C. Fuzzy orthogonal analysis on lab mixing proportion test of cement soil additive [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(4): 117 - 119. (in Chinese)]
- [16] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣, 等. 岩石相似材料摩擦实验装置的改进[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(增刊 1): 127 - 129. [HU X W, TANG H M, LIU Y R, *et al.* Improvement of a friction test equipment for rock similar materials [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(Sup 1): 127 - 129. (in Chinese)]

编辑: 张明霞