

文章编号:1671-8879(2019)03-0036-09

基于 PhotoInfor 的边坡开挖效应模型试验

许旭堂^{1,2}, 简文彬², 张少波², 陈 玮², 洪儒宝²

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 岩土工程与工程地质研究所, 福建 福州 350108)

摘要:为了研究开挖效应对残积土坡坡体内部变形特征及边坡失稳机理的影响,以福宁(福鼎—宁德)高速公路某高路堑边坡为原型,依据相似理论设计地质力学模型所需相似材料及其合理配比,结合自制监测系统和数字照相量测技术,开展基于 PhotoInfor 的多级边坡开挖效应模型试验研究,分析多级开挖过程中模型边坡坡体位移及应力的变化规律。研究表明:开挖过程中边坡坡体变形是由缓慢至加速滑动的渐进过程,坡体中部和坡脚开挖时,坡体内部位移增长速率最快;坡体上部位移大于下部土体位移,且从坡体内部向临空面方向位移逐渐增大;边坡在开挖过程中坡体内部土体应力分布不均,坡脚处应力集中度高,边坡前端推力随着开挖过程逐渐增大;开挖卸载效应打破了边坡原有应力平衡,坡体后缘出现张拉裂隙,裂隙在整个开挖过程中不断发育、扩展和连通,形成贯通裂缝及滑动带,滑动带的形成过程与应力集中→释放→转移→重新调整造成的局部应变集中现象一致;开挖效应具有一定时效性,应力与位移变化并不同步,应变集中具有一定的滞后性,对此类边坡的早期监测,应以水平位移增长速率为控制指标,后期监测应兼顾水平位移和应力水平增长速率,两者缺一不可。该研究成果可为中国东南沿海地区多级边坡开挖的预警监测和支护加固提供重要依据。

关键词:道路工程;残积土;多级边坡开挖;PhotoInfor;地质力学模型;预警监测

中图分类号:U417.11 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.005

Model test on slope excavation effect based on PhotoInfor

XU Xu-tang^{1,2}, JIAN Wen-bin², ZHANG Shao-bo², CHEN Wei², HONG Ru-bao²

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University,

Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Institute of Geotechnical and Geological Engineering,

Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: The effects of deformation characteristics and slope instability mechanism on residual soil slope under the excavation effect were investigated, by using a high cutting slope of the Funing (Fuding to Ningde) Expressway as a sample, a geo-mechanical model using similar materials according to the similarity theory, was designed. A model test study was conducted, using a real-time monitoring system and digital photogrammetry technology on the multi-stage slope excavation effect based on PhotoInfor, and changes of displacement and stress during multi-

收稿日期:2018-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41702288);福建省自然科学基金项目(2015J01164);

福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT170173);交通土建师资队伍博士化国际化工程项目(61201405105)

作者简介:许旭堂(1986-)男,福建安溪人,福建农林大学讲师,工学博士,E-mail:xxtmdd@163.com。

通讯作者:简文彬(1963-),男,福建永定人,教授,博士研究生导师,E-mail:jwb@fzu.edu.cn。

stage excavation of model slope were analyzed. The results show that the variation in the excavated slope is a gradual process from slow deformation to accelerated sliding, the rate of displacement increases the fastest in the slope under the slope excavation at the middle and top positions, the soil displacement at the slope top position is greater than that at the lower part, and the displacement from the slope inside to the hollow face increases gradually. Further, soil stress-distribution is not uniform in the slope excavation process, the stress concentration at the foot of slope is higher, and the thrust at the front end of slope accelerates gradually during the excavation process. The original stress balance of the slope is disturbed when the excavation. A tension crack formed in the rear edge of the slope and then the crack developed, expanded, and connected continuously during the whole excavation process. Then, the crack formed through the fracture and sliding zone. The forming process of the slip zone is consistent with that of the local strain concentration caused by stress concentration, release, transfer and re-adjustment. Meanwhile, the excavation effect possesses a certain time-effect, the stress and displacement change are not synchronized, and the strain concentration shows a certain hysteresis, therefore, the early monitoring of this kind of slope should be considered to choose the control index of the horizontal displacement growth rate. The stress horizontal growth rate should be consider in the post monitoring, both growth rates are indispensable. The research results provide an important basis for early warning monitoring and support reinforcement of excavated slope in the southeast coastal area of China. 3 tabs, 12 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; residual soil; multi-stage slope excavation; PhotoInfor; geo-mechanical model; warning monitoring

0 引言

福建地处东南沿海,山地丘陵发育,在高速公路,铁路、水利、建筑工程建设中,边坡开挖工程日益增多,复杂边坡的治理难度也随之增大。自然边坡因开挖卸载影响,其内部应力逐渐释放,坡体内部应力场分布不均,易出现局部应力集中现象,从而导致局部区域出现塑性破坏,破坏区土体强度进一步弱化,工程性能随之下降。随着开挖持续进行,塑性区域逐渐累积、扩展和贯通,最后导致边坡发生整体失稳破坏。因此,开展边坡开挖效应研究对残积土坡的稳定性评价及其加固设计具有理论及实际意义。

开挖边坡的失稳破坏并非瞬间发生的整体性破坏,而是一个由局部破坏逐渐扩展直至滑动面连通的渐进破坏过程,且局部破坏区域土体的抗剪强度会由峰值强度变为残余强度^[1]。同时,边坡开挖过程中土体内可形成大小不一的裂隙,一旦治理不及时,雨水可通过裂缝进入坡体,不仅导致土体强度大幅下降,而且会使土体体积产生变形,进一步导致裂缝的生长、聚结,伴随贯通裂缝形成的剪切面,滑坡阻力进一步下降,边坡极易失稳^[2-3]。部分学者采用数值分析方法研究开挖边坡的应力变形特性。

Zhang 等针对湖北宜巴(宜昌—巴东)高速公路路堑边坡,分析不同边坡开挖方案的稳定性,从位移和应力角度出发,研究主导边坡开挖稳定性的主要因素,并利用灰关联分析方法,对影响边坡稳定性的敏感性因子进行排序^[4]。Li 等借助线弹性和硬化土模型,模拟开挖边坡稳定性及有、无加固条件下的变形,根据变形预测趋势,设计不同加固方案,以减小开挖过程中的大隆起和水平位移,确保工程安全^[5]。林素明等基于数值模拟和现场监测结果,对路堑边坡上缘的变形演化过程进行研究,指出随着开挖施工的进行,上缘变形越来越大,并且靠近开挖面处最大^[6]。开挖边坡破坏过程中,伴随着滑动带的形成,土体黏聚力 c 和内摩擦角 φ 将以不同速率衰减,因此可采用双安全系数折减法对边坡渐进性破坏稳定性进行计算^[7]。陈国庆等通过动态折减边坡土体单元强度指标,计算边坡潜在滑动面,该方法较为真实地反映边坡潜在滑动面形成的整个过程,并表明边坡位移变化趋势与局部破坏区演化过程的一致性^[8]。张振华等为了准确表达边坡在施工开挖过程中的动态变形规律并体现边坡开挖的渐进性破坏,提出了基于设计安全系数和破坏模式的边坡开挖过程的动态变形监测和预警研究新方法^[9]。Ji 采用应

力路径分析方法研究了边坡整体开挖过程,指出边坡脚趾受到明显的应力集中而向周边扩展,不利于边坡稳定^[10]。Anbazhagan 等采用圆形失效图(CFC)和极限平衡法评价 Kollu 山丘路段的边坡稳定性,结果显示强降雨期间部分路段边坡可能失稳^[11]。

许多学者通过模型试验研究开挖边坡失稳机理^[12-18]。高喜才通过对某露天矿区内边坡分步开挖形成过程的物理模型研究,分析在开采影响范围内边坡的应力梯度和动态位移特征;通过对监测数据的统计分析得出开挖边坡过程中不同阶段的应力、应变曲线,将开挖边坡的变形区域划分为断层下沉错动区、沿软弱结构面滑移变形区、坡脚塑性变形区 3 个主要的变形区域,指出坡脚剪切滑移变形区位移值最大,位移变化范围也最大,同时坡脚处应力集中的程度最为明显^[13]。Fan 等借助离心模型试验研究不同开挖坡角对黄土边坡的影响,采用粒子图像测速系统测量黄土斜坡的位移,指出开挖坡角对变形发展和边坡分区有显著影响^[14]。

综上,目前研究主要集中于理论分析,数值模拟及结合现场监测数据对开挖边坡失稳破坏的机理进行研究,而较少开展基于 PhotoInfor 的多级边坡开挖效应模型试验研究^[15-18]。为此,本文利用自制模型箱、数据采集和监测系统,开展边坡开挖效应模型试验,实时监测开挖诱发边坡失稳的全过程;采用 PhotoInfor 数字照相量测软件对开挖引起的坡体变形进行分析,研究开挖效应时效性及应力、位移变化规律,探讨边坡失稳破坏形式及条件,为东南沿海地区开挖诱发边坡失稳预警预测及边坡的加固设计提供重要依据。

1 试验方法

1.1 试验原理

地质力学模型试验^[19]是根据弹性力学的基本原理,按一定设计比例将边坡原形系统的几何特征和物理力学参数缩小成试验模型系统,通过对地质模型的分析研究,确定相同条件下边坡原形系统应力场和位移场的变化情况。通常把实际原型和试验模型之间相同物理量的比值称为相似常数。试验中各几何、物理、力学参数的相似系数可表示为

$$\begin{aligned} C_l &= l_p / l_m, C_\gamma = \gamma_p / \gamma_m, C_E = E_p / E_m, C_\nu = \nu_p / \nu_m, \\ C_\delta &= \delta_p / \delta_m, C_\sigma = \sigma_p / \sigma_m, C_\tau = \tau_p / \tau_m, C_\epsilon = \epsilon_p / \epsilon_m, \\ C_c &= c_p / c_m, C_\varphi = \varphi_p / \varphi_m \end{aligned} \quad (1)$$

式中: l 、 γ 、 E 、 ν 、 δ 、 σ 、 τ 、 ϵ 、 c 、 φ 分别为土体的几何尺

寸、重度、弹性模量、泊松比、位移、正应力、剪应力、应变、黏聚力、内摩擦角,下标 p 表示边坡原型,下标 m 表示试验模型; C_l 为几何相似比; C_γ 为重度相似比; C_E 为弹性模量相似比; C_ν 为泊松比相似比; C_δ 为位移相似比; C_σ 为正应力相似比; C_τ 为剪应力相似比; C_ϵ 为应变相似比; C_c 为黏聚力相似比; C_φ 为内摩擦角相似比。

根据相似理论原理,试验模型中各相似系数具有以下关系

$$\begin{aligned} C_E &= C_\sigma = C_\tau = C_\delta = C_l C_\gamma, \\ C_c &= C_\nu = 1 : 1 \end{aligned} \quad (2)$$

一般地,在地质模型试验中重度相似比 C_γ 取 1 : 1,这样只需确定几何相似比 C_l ,其余相似系数即可得到。对于地质模型试验,很难同时满足所有的相似条件,只能在某些性质上与原型相似。因此,试验前应先确定对地质原型系统稳定性起主导作用的因素,保证满足主要相似条件,为分析开挖边坡过程引起的坡体变形,应关注与变形有关的参量,本文选择 C_l 、 C_E 、 C_ν 、 C_c 、 C_φ 作为主要的相似常数。

1.2 试验装置

开挖边坡渐进性破坏地质模型试验装置主要包括:模型槽、土压力传感器、测量系统及数据采集系统等,室内物理模拟试验装置模型如图 1 所示。模型槽尺寸为 3 m(长)×2 m(宽)×1.5 m(高)。为了便于观察边坡开挖的变形动态发展过程并记录边坡坡体位移变化,模型槽两侧面采用钢化玻璃制成;同时,每次试验前在钢化玻璃表层均匀涂抹一层凡士林,以减小土体与侧面钢化玻璃的摩擦,尽可能减小边界效应对试验结果的影响。采用土压力传感器来监测开挖过程中边坡坡脚处土体的竖向应力、边坡前端推力以及坡体中部水平应力的变化情况,埋设方向如图 2 所示。监测件与各自传感器相连后,接入图 3(a)自动化系统数据采集传输系统,当串行口参数设置好时,将传感器编号及命名等基本信息录入和保存系统,数据采集系统界面如图 3(b)所示。通过采集系统实时记录数据,可分析边坡开挖过程中坡体内部应力及变形演变规律。

1.3 数字照相量测

模型试验采用 PhotoInfor 数字照相软件系统测量开挖过程中边坡变形与位移。PhotoInfor 软件作为一套实用性很强的数字照相量测软件系统,已在岩土工程、桥梁与隧道工程和林业工程等多学科中成功应用^[20-23]。该系统由图像分析软件 PhotoInfor 和结果后处理软件 PostViewer 组成,操作

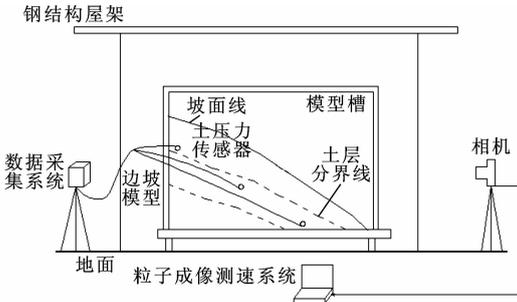


图 1 开挖边坡模型试验装置

Fig. 1 Model test devices for excavated slope

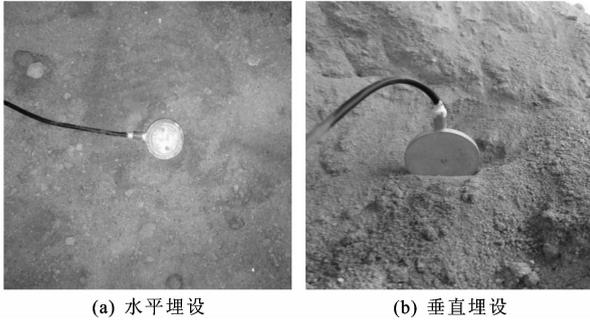


图 2 土压力传感器

Fig. 2 Earth pressure sensor



图 3 数据采集系统

Fig. 3 Data acquisition system

界面如图 4 所示。PhotoInfor 软件量测的绝对精度 = 目标(长 × 宽, mm) / 图像(长 × 宽, 像素)^[21], 因此图像采集应使用高分辨率照相设备, 使变形量测结果尽可能可靠、精度高; 试验中要确保拍摄光源均匀且一致, 并尽量保持照相设备位置固定。整个试验中坡体变形特点和相关后处理可通过 PostViewer 软件实现。试验采用 3 台高分辨率单反相机(架设于模型槽的侧面)对开挖边坡的坡顶、坡脚进行拍摄, 同时用另外一台数码相机对边坡的坡面及局部破坏区进行局部微观拍摄, 相机架设置位置如图 5 所示。

1.4 相似比设计及相似材料配制

模型边坡对应的实际工程位于福建省福鼎市八尺门大桥南岸福宁(福鼎—宁德)高速公路连接线 K0+390~K0+410 段。经开挖后形成高路堑边

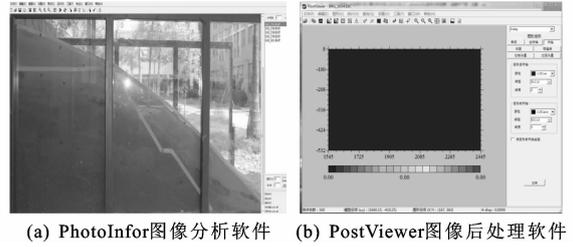


图 4 PhotoInfor 数字照相软件测量系统

Fig. 4 PhotoInfor digital camera measuring system

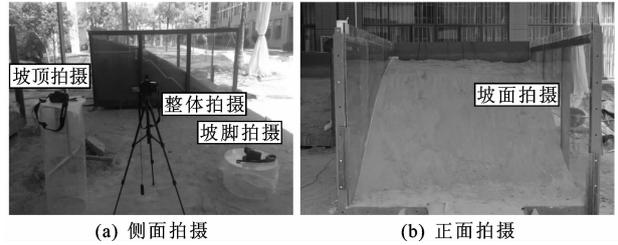


图 5 相机架设置位置

Fig. 5 Mounting camera position

坡, 研究区各岩土层分布见图 6, 原边坡由残积砂质黏土(W₁)、全风化花岗岩(W₂)、砂土状强风化花岗岩(W₃)构成, 其物理力学参数见表 1。考虑模型槽尺寸、边坡规模及开挖条件下边坡自重应力重分布, 选择 C_t = 20 : 1, C_γ = 1 : 1 作为模型相似比设计; 取 C_E = 20 : 1, C_σ = 20 : 1, C_δ = 20 : 1, C_c = 20 : 1, C_φ = 1 : 1。

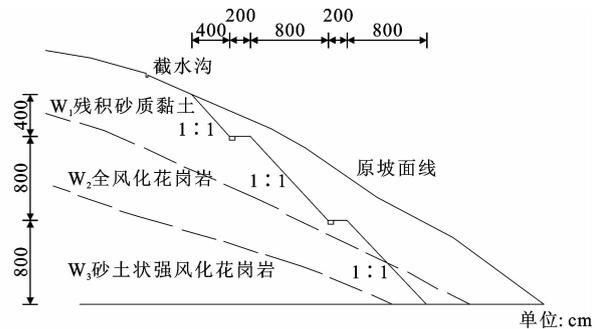


图 6 实际边坡工程地质剖面

Fig. 6 Engineering geological profile of actual slope

表 1 原型边坡各土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of slope soils

土层	含水率/%	重度 γ/(kN · m ⁻³)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
W ₁	18.8	19.5	23.6	27.5	19.7	0.35
W ₂	14.9	21.2	26.7	29.4	22.8	0.32
W ₃	14.7	23.5	32.3	35.0	31.2	0.28

通过反复试验, 最终确定以粗砂、标准砂(含水率 4%)、黏土(含水率 10%)、膨润土、滑石粉作为配置滑体相似材料的原料。其中: 粗砂、标准砂及黏土

作为边坡土层相似材料配比的主体骨料,膨润土、滑石粉作为调整黏聚力与内摩擦角的敏感材料。相似材料配比过程中适当增加各层材料的重度和黏聚力,以确保模型具有一定的自立性和自稳性,各土层相似材料配比(质量比)及主要相似指标见表2、表3。严格按照相似理论来确定相似材料是非常困难的,只能选择相对符合相似理论较优的材料作为模型试验材料^[18],由表2、表3可知,本文所选材料能较好反映边坡土层的实际力学性质。

表2 各土层相似材料配比

Tab. 2 Similar material ratios in different soil layers

土层	粗砂	标准砂	黏土	膨润土	滑石粉	水
W ₁	0.55	0.47	0.85	0.17	0.11	0.29
W ₂	0.91	0.56	0.78	0.13	0.07	0.26
W ₃	1.47	0.52	0.68			0.30

表3 模型边坡各土层物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of model slope soils

土层	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
W ₁	20.6	1.6	22.5	1.0	0.37
W ₂	25.0	2.0	25.0	1.2	0.31
W ₃	27.8	2.3	33.1	1.5	0.26

1.5 监测点布置

试验监测点设置在边坡模型的坡顶、中部以及坡脚位置,如图7所示。选择3个水平断面Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ作为监测平面,在坡顶和坡中分别埋设土压力传感器 T_1 、 T_2 ,监测边坡坡体内的水平应力;在坡脚垂直和水平方分别埋设土压力传感器,以监测边坡坡脚处土体的竖向应力 T_H 和边坡的前端推力 T_P ;同时,在采用 PhotoInfor 软件对开挖边坡坡体位移分析时,选取3个竖向断面,主要位移分析点为每级边坡开挖后形成的台阶坡脚处 S_1 、 S_2 、 S_3 。

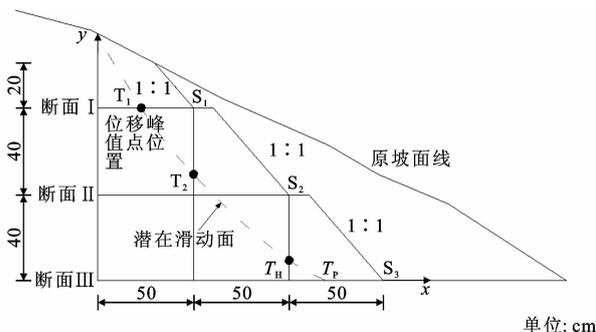


图7 模型试验监测点布置及潜在滑动面示意

Fig. 7 Sktech of location of monitoring points and potential sliding surface of model experiment

1.6 试验方案

开挖边坡渐进性破坏的模型试验是为了研究其破坏的发生机理及渐进性发展过程,分析残积土边坡在不同开挖阶段下坡体内部土体应力分布情况及位移场变化特征,重点讨论因应力集中造成局部塑性破坏区对开挖边坡渐进性破坏的影响。试验方案如下。

(1)模型槽标记。在模型槽一侧的钢化玻璃上用黄色胶带和红色油漆画出边坡的原始坡面线、不同土层的地层分界线及开挖后形成的坡面线以及主要监测点位置,见图5(a)。

(2)制作相似材料、边坡成型和埋设监测件。按相似原理及各土层含水率(表1),确定相似材料及其配比(表2);分层填筑边坡模型,填筑至设计监测点位置时,埋设监测点压力传感器。各层填筑完成后,用环刀在已成模型坡体内均匀取样,计算密实度和含水率(表1),及时调整填筑方案和含水率。随后坡面平整,完成整个试验模型填筑。

(3)定点架设高分辨率相机,采集开挖过程的实时数字照片,正面拍摄见图5(b)。

(4)边坡开挖、采集及数据分析。对该边坡模型自上而下分4级开挖,首先开挖第1级台阶(坡顶),然后逐一开挖第2级、第3级台阶,最后开挖第4级台阶(坡脚)。实时监测开挖过程中坡体应力变化,并拍摄开挖过程实时数字照片,以实现多级开挖条件下坡体变形的监测。

2 结果与分析

2.1 开挖模型边坡位移监测结果

为实现对多级边坡开挖渐进性破坏过程中坡体变形的监测,采用 PhotoInfor 软件对开挖引起的坡体变形实时图片进行分析。首先,通过该软件自动搜寻到滑坡位移最先启动点 D_1 ,如图8所示;其次,以 D_1 点为开挖边坡模型试验渐进性破坏过程的基准点,借助 PhotoInfor 软件获取该模型边坡在开挖过程中坡体内部各监测点的相对位移增量变化曲线;最后,分析位移实时曲线,研究不同开挖条件下边坡由局部→渐进性破坏→整体滑动的失稳机理。

2.1.1 坡脚监测点位移变化

图9为开挖模型边坡坡脚监测点的位移实时曲线。由图9可知,随着边坡的开挖,坡体内部应力释放,边坡一定范围内变形逐渐增大,坡体内部3个主要位移监测点均有明显的位移增量。上部台阶坡脚处监测点的位移大于下部台阶,且从上至下位移有

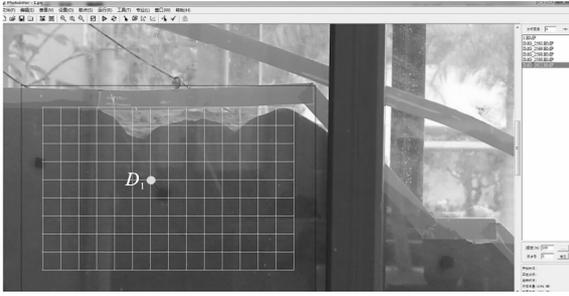
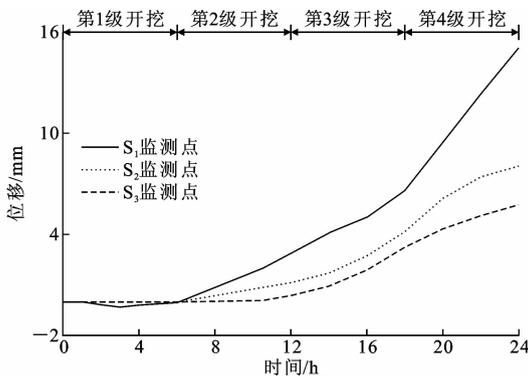


图8 开挖边坡模型位移监测基准点

Fig. 8 Displacement monitoring datum point of excavated slope model

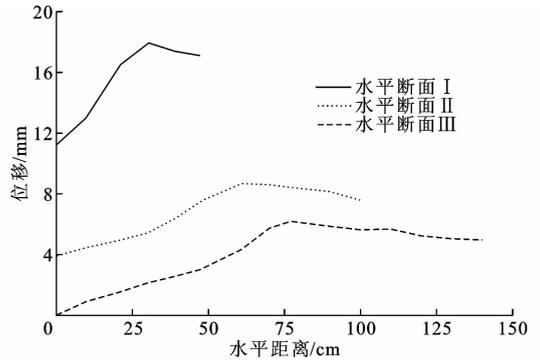
图9 不同开挖阶段下监测点位移-时间变化曲线
Fig. 9 Change curves of displacement and time under different excavated conditions

逐渐减小的趋势,位移方向多指向开挖坡脚和临空面方向。第1级边坡开挖时, S_2 、 S_3 监测点位移变化不明显,因坡顶开挖造成的卸载回弹效应,坡顶土体位移出现轻微的反弹增大现象, S_1 监测点位移为0.31 mm;第2级坡面开挖完成时(时间 $t=12$ h),各监测点位移均缓慢增加,坡顶位移增速稍快,但此时开挖效应对边坡影响不大,边坡处于初始变形阶段;第3级开挖时($12\text{ h}<t<18$ h),监测点位移增加明显,且 S_1 监测点位移增量最大,达到6.13 mm,此阶段边坡整体变形速率增加,开挖造成的渐进性变形累积效应较为明显;当边坡位于第4级开挖时(坡脚处开挖),监测点位移仍持续增加,与第3级坡面开挖相比,土体的位移增量更大,变化速率更快,表明坡脚开挖阶段对模型边坡影响更大,边坡易处于加速滑动状态,整体稳定性较差、累积变形量大,上部位移比下部变化快,边坡整体已发生渐进性破坏。综上,开挖边坡坡体内的土体位移的变化是由缓慢变形至加速滑动的渐进过程。

2.1.2 坡体水平断面位移变化

图10为水平断面I、II、III上土体的位移随水平距离的变化规律。由图10可知:越靠近临空面方

向,坡体位移越大;上部断面土体的位移值明显大于下部土体,且变化幅度更大,从坡体内部到坡面位移增量达7.33 mm,而下部断面的位移变化量较小,最大位移增量约为3.10 mm。由开挖边坡坡体变形规律可知,潜在滑动面上的土体变形达到峰值,因此根据水平断面上位移峰值点分布(滑动面与水平轴的交点),基本可确定该开挖模型边坡滑动面在坡体内的位置,如图7所示。

图10 土体位移与水平距离的变化曲线
Fig. 10 Change curves of displacement with the horizontal distance

2.1.3 边坡后缘裂缝发育过程

花岗岩残积土具有较强的结构性,此类土体一般继承或部分保留原岩残留结构面^[24-25],与一般土坡相比,这种结构性及原有结构面使得残积土坡在开挖过程中具有较强的开挖卸荷效应。开挖时边坡后缘常出现张拉裂缝,局部裂缝的破坏对边坡的稳定性极其不利,可进一步加剧边坡滑动。开挖模型边坡张拉裂缝发育过程如图11所示。由图11可知:第2级边坡开挖后,坡顶处局部土体出现细小裂纹,此时裂纹长度较小且分布不集中;第3级边坡开挖时,裂隙逐渐从坡表面向坡体内部扩展,长度增加,但仍未成片,处于相互独立的状态;第4级边坡开挖时,边坡后缘张拉裂缝逐渐连接、贯通且向坡体内部一定深度发展,局部区域已有明显的滑动变形,此时边坡滑面也初步形成;随着时间的推移,滑面逐渐扩展,边坡可发生整体滑移破坏。实际边坡工程开挖过程中,应及时治理、支护,避免因降雨等其他因素造成开挖过程中边坡失稳破坏。

2.2 开挖边坡模型应力监测结果

监测坡体中部的水平应力 T_2 、坡脚处土体的竖向应力 T_H 和边坡的前端推力 T_P 随时间的变化如图12所示。

由图12可知,从整个开挖过程来看,边坡的坡脚处前端推力 T_P 始终不断增大,且变化速率较大,

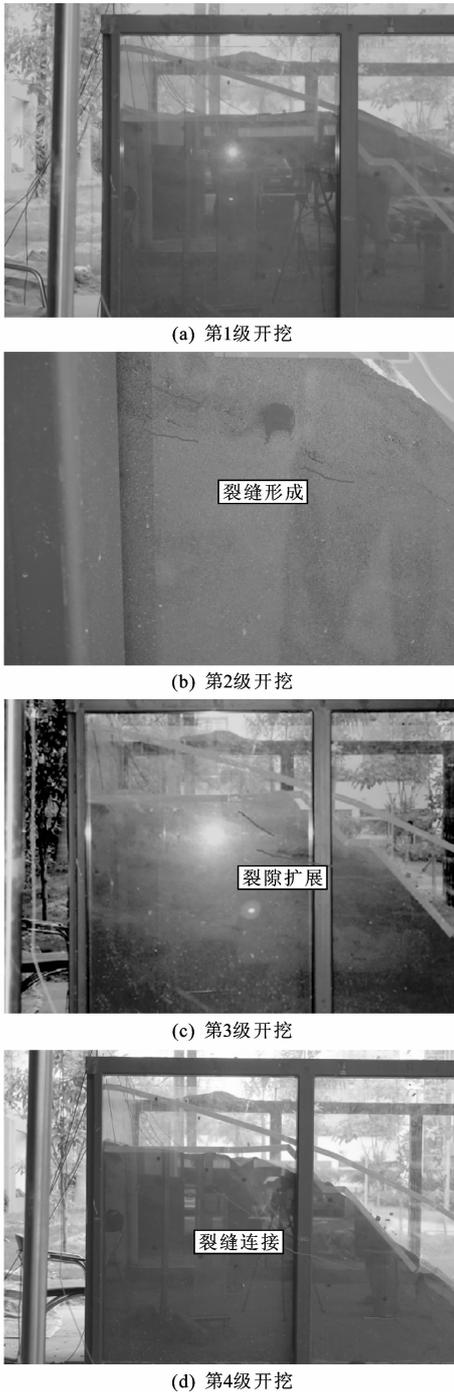


图 11 开挖模型边坡张拉裂缝发育过程

Fig. 11 Tensile crack development of excavated model slope

直至第 4 级开挖时边坡前端推力出现峰值,这是由于开挖卸载引起坡体内部应力释放,边坡在坡脚处出现应力集中,导致前端推力达到最大值。坡体中部水平应力 T_2 在第 1 阶段开挖有所下降,随后缓慢增长,其变化幅度小于坡脚前端推力,这表明开挖边坡过程中坡体内部应力分布不均,导致开挖边坡在坡脚处的应力明显大于边坡内部,且具有较大的变化幅度。同时,因开挖卸载,坡脚处竖向应力 T_H

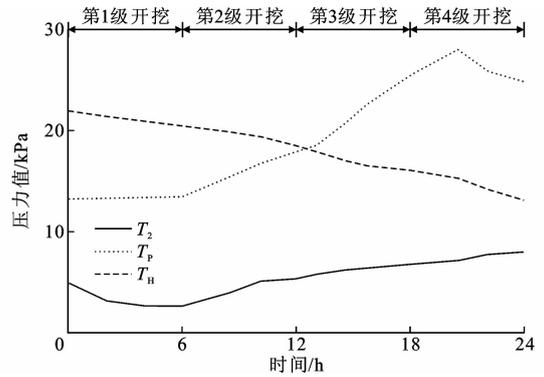


图 12 各监测点应力的实变曲线

Fig. 12 Stress real-time curve of each monitoring point

整体呈现下降趋势。应力监测结果与监测点位移实变曲线基本吻合。模型边坡在整个开挖过程中,坡体不同位置水平应力皆有不同程度增加,导致坡体变形不断增加,且以水平位移为主。开挖卸载使边坡原有的应力平衡被打破,坡体后缘局部首先产生塑性破坏,出现张拉裂隙,随着开挖的进展,裂隙不断发育、扩展和连通,形成裂缝;宏观裂缝在破裂→应力转移→破裂的循环中持续发育,并向坡体内部延伸,引起坡体内部塑性破坏区贯通、滑动面形成,边坡易处于临界失稳状态,整个破坏过程伴随着应力集中→释放→转移→重新调整造成局部应变集中现象。

值得注意的是,坡体中、上部位置土体位移实变曲线变化显著,但应力水平变化却不明显。这主要是边坡开挖效应具有一定时效性,应力与位移变化并不同步,应变集中效应具有一定的滞后性,随着时间推移,边坡坡脚位移实变趋势也将逐步增加,直至开挖效应消失。因此,对于此类结构性强的边坡,开挖过程中应注意坡脚位置水平位移的变化,除了分析总位移外,还应以水平位移增长速率为控制指标(如前端推力在第 2、3 级开挖过程中,其增速远大于第 4 级开挖),以避免开挖未完成就出现边坡失稳的状况;同时,应兼顾开挖时效性,加强后期应力实时监测,避免边坡产生突发性失稳。

3 结 语

(1) 开挖边坡坡体内部变形是由缓慢变形至加速滑动的渐进过程。整个开挖过程中,坡体上部的位移大于下部土体的位移,且从坡体内部向临空面方向位移逐渐增大。开挖边坡的滑动面位置可根据不同水平断面上的位移峰值点确定。

(2) 开挖卸载引起边坡原有应力平衡状态发生

破坏,坡体后缘形成张拉裂隙并不断发育、扩展和连通成裂缝,随着塑性破坏区的贯通,滑动带形成,滑动带的形成过程与应力集中→释放→转移→重新调整造成的局部应变集中现象一致。

(3)边坡在开挖过程中坡体内部土体的应力分布不均匀,坡脚处土体的应力集中程度较高,边坡前端推力随着开挖过程的进行而逐渐加速增大;坡脚处应力值远大于坡体中部土体应力值,并具有较大的变化范围。开挖效应具有一定时效性,应力与位移(应变集中)变化并不同步,边坡土体应力集中程度越明显,边坡稳定性越差。

(4)多级开挖边坡的渐进性破坏是一个累积渐变的过程,对于此类边坡的监测,早期可以水平位移增长速率为控制指标,避免开挖期间边坡失稳;而后期应兼顾应力水平增长速率,确保开挖完成后边坡稳定。

(5)本文结论是基于多级花岗岩残积土边坡开挖及开挖坡率为1:1的条件,不同坡型和开挖形式下的边坡渐进性破坏值得进一步研究。实际边坡工程的开挖往往伴有原生或次生裂隙,可进一步考虑雨水入渗对开挖过程中坡体内部变形的影响;同时,可结合数值分析手段,开展多级边坡开挖过程内部应力场和位移场的变化规律研究,以复核试验结果,为边坡开挖失稳预测预报提供借鉴。

参考文献:

References:

- [1] 卢肇均. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 3-9.
LU Zhao-jun. Problems on the research of shear strength of clay soils [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 3-9.
- [2] XU L, DAI F, CHEN J, et al. Analysis of a progressive slope failure in the Xiangjiaba reservoir area, Southwest China[J]. Landslides, 2014, 11(1): 55-66.
- [3] WANG J J, LIANG Y, ZHANG H P, et al. A loess landslide induced by excavation and rainfall[J]. Landslides, 2014, 11(1): 141-152.
- [4] ZHANG X, TANG Z Y. Slope excavation and parameter sensitivity analysis based on grey correlation method[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 21: 4549-4558.
- [5] LI Z Q, OYEDIRAN I A, TANG C, et al. FEM application to loess slope excavation and support: Case study of Dong Loutian coal bunker, Shuozhou, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(4): 1013-1023.
- [6] 林素明, 李建福. 路堑边坡施工过程中后缘变形演化分析[J]. 土工基础, 2014, 28(6): 99-102.
LIN Su-ming, LI Jian-fu. Deformation at the crest of highway cut slopes[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(6): 99-102.
- [7] 唐芬, 郑颖人, 赵尚毅. 土坡渐进破坏的双安全系数讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1402-1407.
TANG Fen, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Discussion on two safety factors for progressive failure of the soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1402-1407.
- [8] 陈国庆, 黄润秋, 周辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1140-1146.
CHEN Guo-qing, HUANG Run-qiu, ZHOU Hui, et al. Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1140-1146.
- [9] 张振华, 冯夏庭, 周辉, 等. 基于设计安全系数及破坏模式的边坡开挖过程动态变形监测预警方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 603-612.
ZHANG Zhen-hua, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Research on dynamic early warning method of slope deformation monitoring during excavation based on designed safety factor and failure mode[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 603-612.
- [10] JI Zhao-hong. Stability of soil cutting and side slope based on stress route theory[J]. Urban Transportation & Construction, 2015, 1(2): 1-4.
- [11] ANBAZHAGAN S, RAMESH V, SARANAATHAN S E. Cut slope stability assessment along ghat road section of Kolli hills, India [J]. Natural Hazards, 2017, 86(3): 1081-1104.
- [12] STANIER S A, WHITE D J. Improved image-based deformation measurement in the centrifuge environment[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(6): 915-928.
- [13] 高喜才. 露天矿边坡开挖过程变形破坏特征及稳定性实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
GAO Xi-cai. Experimental research on stability and dynamic displacement characters due to slope excavation in open-pit mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006.
- [14] FAN Z, KULATILAKE P, PENG J, et al. In-flight excavation of a loess slope in a centrifuge model test [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016,

- 34(5):1577-1591.
- [15] 许旭堂,简文彬,吴能森.反复吸湿循环对原状残积土剪切特性的影响[J].中国公路学报,2017,30(2):33-40.
XU Xu-tang, JIAN Wen-bin, WU Neng-sen. Influence of repeated wetting cycles on shear properties of natural residual soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 33-40.
- [16] 陈祖煜,蔡云鹏,王玉杰,等.边坡倾倒稳定分析 Goodman-Bray 法:改进、测试与应用[J].中国公路学报,2018,31(2):30-38.
CHEN Zu-yu, CAI Yun-peng, WANG Yu-jie, et al. Improvement, testing and application on Goodman-Bray method for stability analysis of toppling slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 30-38.
- [17] TU X B, KWONG A K L, DAI F C, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides [J]. Engineering Geology, 2009, 105(1/2): 134-150.
- [18] TAKEMURA J, KONDOH M, ESAKI T, et al. Centrifuge model tests on double propped wall excavation in soft clay[J]. Soils and Foundations, 1999, 39(3): 75-87.
- [19] 罗先启,葛修润.滑坡模型试验理论及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and application of model test on landslide[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [20] 李元海,靖洪文,刘刚,等.数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):1684-1690.
LI Yuan-hai, JING Hong-wen, LIU Gang, et al. Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1684-1690.
- [21] 李元海,林志斌,靖洪文,等.含动态裂隙岩体的高精度数字散斑相关量测方法[J].岩土工程学报,2012,34(6):1060-1068.
LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin, JING Hong-wen, et al. High-accuracy digital speckle correlation method for rock with dynamic fractures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1060-1068.
- [22] 李元海,靖洪文,曾庆有.岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):3859-3866.
LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZENG Qing-you. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3859-3866.
- [23] 许薛军,张肖宁.基于双目视觉的公路边坡表面位移识别方法[J].中国公路学报,2015,28(4):27-34.
XU Xue-jun, ZHANG Xiao-ning. Highway slope displacement identification method based on binocular vision [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(4): 27-34.
- [24] 陈玮,简文彬,董岩松,等.软弱结构面对花岗岩残积土边坡稳定性影响[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):23-30.
CHEN Wei, JIAN Wen-bin, DONG Yan-song, et al. Influence of weak structural surface on stability of granite residual soil slopes [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 23-30.
- [25] 许旭堂,简文彬,吴能森,等.降雨诱发残积土坡失稳的模型试验[J].中国公路学报,2018,31(2):270-279.
XU Xu-tang, JIAN Wen-bin, WU Neng-sen, et al. Model test of rainfall-induced residual soil slope failure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 270-279.