

文章编号: 1674—8247(2023)02—0070—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 02. 014

某红层深挖路堑基底上拱离心模型试验研究

刘毅¹ 程谦恭² 陈梦发² 常仁举²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要:本文以成自铁路球溪站深路堑工点为研究对象,开展了外业调查、资料整理和模型选取,通过离心机模型试验分析开挖深路堑前后应力场和位移变化规律,探究路堑坡体开挖后基底不同深度水平应力与竖向应力变化的特征、相对大小关系及变形情况,结果表明:(1)深路堑坡体开挖后,基底埋深一定深度范围内,水平应力调整为大于竖向应力,基底中部上拱变形量最大;(2)水平应力与竖向应力的大小关系是导致深路堑基底产生上拱变形的关键因素。

关键词:红层软岩;离心模型试验;应力状态;位移变形

中图分类号:U416.1⁺3 文献标识码:A

An Experimental Study on Centrifugal Model of Upheaving of Deep Cutting Base in the Red Bed

LIU Yi¹ CHENG Qiangong² CHEN Mengfa² CHANG Renju²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on a case study of the deep cutting made on the construction site of Qiuxi Station of the Chengdu-Zigong Railway by field investigation, data sorting, and model selection, the change rules of stress field and displacement before and after excavation of deep cutting were analyzed in this paper by centrifuge model test, and the change characteristics, relative magnitude relationship of horizontal and vertical stress at different depths of the base after excavation of cutting slope and the deformation of the base were explored. The results show that: (1) After the excavation of the deep cutting slope, the horizontal stress is adjusted to be greater than the vertical stress within a certain depth of the base, and the upheaval deformation in the middle of the base is the largest. (2) The relationship between horizontal and vertical stress is the key factor leading to upheaval deformation of the deep cutting base.

Key words: soft rock in red bed; centrifugal model test; state of stress; displacement deformation

我国西南地区红层软岩广泛分布,红层软岩工程性质差,强度低、颗粒易破碎、遇水易软化、失水易崩解、易风化,具有一定的膨胀性和流变性,其特殊的工

程特性使该区铁路工程建设受到较大影响^[1-2]。西南区域地形复杂,气候多雨湿润,降水后排水不便,这种特殊的地质环境更增大了红层区工程病害发生的频

收稿日期:2022-12-01

作者简介:刘毅(1978-),男,高级工程师。

引文格式:刘毅,程谦恭,陈梦发,等.某红层深挖路堑基底上拱离心模型试验研究[J].高速铁路技术,2023,14(2):70-74.

LIU Yi, CHENG Qiangong, CHEN Mengfa, et al. An Experimental Study on Centrifugal Model of Upheaving of Deep Cutting Base in the Red Bed [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 70-74.

率与程度^[3]。高速铁路修建在红层软岩区域时,路堑开挖后经常出现边坡变形失稳,深路堑开挖出现基底上拱等现象^[4]。国内外学者对路堑边坡变形失稳研究较多,然而对深挖路堑基底持续上拱变形原因和机理却少有研究^[5]。

近年来,高速铁路无砟轨道软质岩深路堑基底上拱变形病害常有发生,严重影响了铁路的正常运营,成了红层软岩地区高速铁路建设亟需解决的问题,学者对此进行了研究与探讨,并获得了一些研究成果^[6-8]。然而,现有研究主要以已经发生病害的工点为研究对象,鲜有针对开挖前-开挖后全过程基底上拱变形的内在机理的研究。

本文以成自铁路球溪站深挖路堑为研究对象,通过工程开挖前-开挖后全过程路堑基底离心模型试验^[9-11],分析工程基底应力特征的变化与分布特征、基底不同深度位移的变化特征等;从地质条件入手,分析开挖前-开挖后全过程对基底上拱变形的影响及上拱的内在变形机理。研究成果可为红层软岩地区进行线路工程建设提供技术支撑,并对运营铁路工程整治措施提供有益参考。

1 工程概况

球溪站位于四川省资中县球溪镇,设计路堑位于铁路线 DK 111+600~DK 113+000,中心里程 DK 112+308,全长 1 400 m,最大挖深约 36 m,设有配套设施以及 1 处涵洞。一侧设计为四级高边坡,开挖深度约 36 m,另一侧为二级低边坡,开挖深度约 20 m,开挖断面长约 187 m。

2 工程地质背景

2.1 地形地貌

球溪站所处于丘陵地貌区,多为浑圆状缓丘,自然斜坡坡度 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,丘间多为宽缓沟槽,地面高程 368~410 m,相对高差约 5~20 m,地形起伏较大。线路附近村庄民房零星分布,局部有水田、鱼塘。

2.2 地层岩性

球溪站测段地表上覆第四系全新统坡洪积(Q_4^{dl+pl})软黏土、松软土、粉质黏土、坡残积层(Q_4^{dl+pl})粉质黏土;下伏地层为侏罗系中统下沙溪庙组、上沙溪庙组下段,岩性以砂岩夹泥岩互层为主。泥岩呈紫红、灰褐色,泥质结构,厚层状为主,主要以黏土矿物组成,易风化剥落,具有遇水软化崩解、失水收缩开裂等特性;砂岩呈青灰、棕黄色,粉砂质结构,泥钙质胶结,中厚层状,节理较发育。

2.3 地质构造

球溪站位于扬子准地台之川中台坳,川中丘陵区块体是相对隆起带(四川沉降褶皱带),地表广泛出露侏罗系大片基岩,岩体较完整,产状变化不大,节理较发育,表层岩体风化破碎,区域构造形迹微弱,无明显线性构造,具有一定水平地应力作用,主要构造应力场方向为北西向,主要受龙门山推覆构造及喜山后期东西向水平挤压影响。区域地震动峰值加速度为 0.05 g,地震动反应谱特征周期为 0.35 s。

2.4 水文地质条件

球溪站所处区域地表水不发育,局部有暂时性流水,以大气降水补给为主。测区地下水主要为第四系孔隙潜水、基岩裂隙水,地下水位埋深 3~5 m,局部陡坎地段埋深大于 10 m,地下水位受季节变化影响较大。第四系孔隙潜水主要赋存于第四系松散土层中,主要受大气降水补给,下渗排泄。基岩裂隙水主要分布于基岩及风化层裂隙中,受孔隙水及大气降水补给,向低洼处排泄。

3 离心机模型试验

3.1 试验设备

本文试验采用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 TLJ-500 型土工离心机。试验设备包括:离心机主机、900 KW 直流电机、减速器、全数字直流调速装置、加速度控制与测量系统、主控制台、集流环、测量系统、电视监视通讯系统、模型箱等。离心机基本性能参数如表 1 所示。

表 1 TLJ-500 土工离心机主要技术指标表

最大容量/(g·t)	离心加速度/g	有效半径/m	速度范围/(r/min)	有效荷重/t	吊斗容积/m
500	10~250	4.0	44.6~222.8	5(加速度 100 g) 2(加速度 250 g)	1.0×1.0×0.8

3.2 模型材料

试验选用的模型箱尺寸为 1.0 m×1.0 m×0.8 m。为了更准确地模拟路堑基底的实际情况、方便模型的制作,并综合考虑离心模型试验中的边界效应的影响,模型比尺 n 确定为 1:120。

离心试验中的模型满足与原型应力相等、应力状态相同的条件,在满足主要的相似条件,离心模型试验就可以进行直至破坏的全过程等应力力学模型试验。根据常见参数比例关系,本文的离心模型试验的相似比如表 2 所示。

本文试验的模型材料,采用现场胶结情况较好的块状泥岩风化物 and 具有一定风化程度的块状砂岩碾

表 2 等应力离心模型试验中的相似比表(原型/模型)

物理量	容重	位移	体积	应力	应变	时间
相似比	1/n	n	N ³	1	1	n

压、再重塑的原样土,将试样晒干、碾碎、过筛,达到试验设计的模型的密度和含水率,分层填筑模型,每层尽量击实,严格控制好压实度,最大程度地保持接近原岩的性质状态。

3.3 开挖方案

目前在离心模型试验中模拟岩土体开挖的方式主要分为两类。第一种为在离心机停机时没有离心加速度的条件下进行土体开挖,第二类为在离心机运行时具有离心加速度的情况下直接进行岩土体的开挖模拟。第二类离心场中开挖模拟的常见方式有排液法、分层移出模型内土层法、机械手等微型装置开挖法。综合考虑安全、人员、时间等因素,本文采用操作较为方便的停机开挖法进行离心模型试验的开挖模拟。

3.4 监测方案

路堑坡体的开挖会改变坡体应力场状态,探究路堑坡体开挖后基底不同深度水平应力与竖向应力变化的特征,本文离心模型试验采用微型土压力盒监测坡体开挖前后基底应力变化,共埋设 13 个土压力传感器,2 号、5 号、8 号、11 号和 12 号监测竖向应力、其余监测水平应力,埋设位置如图 1 所示。

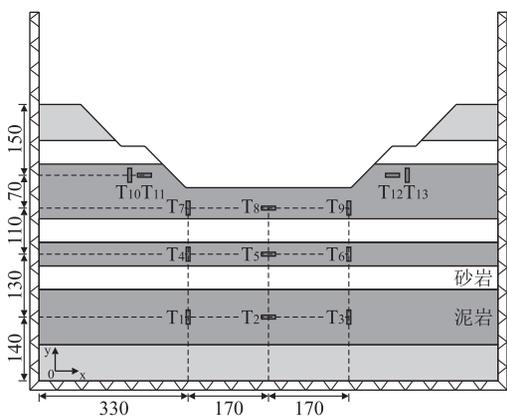


图 1 土压力传感器布置图(mm)

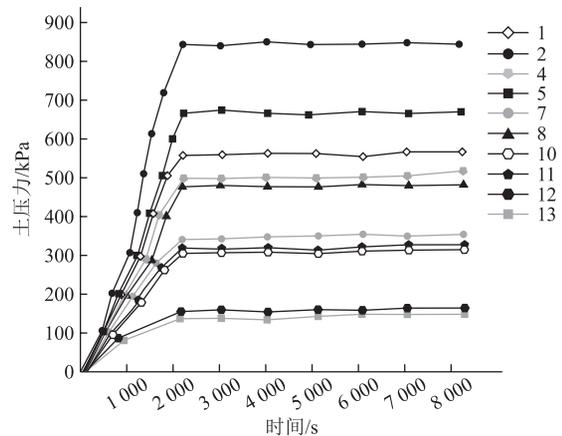
在离心试验过程中,利用安置在模型箱观测面的高速摄像机,固定帧率定点拍摄并记录模型箱内的地层位移变化。高速摄影机得到的试验照片可以导入 GetData 软件设定基准坐标轴,依次读出标记点在各个试验阶段的位移变化,并利用参照网格换算得到实际长度,进而得到路堑基底不同深度、不同位置处的位移变形特征。

4 试验数据分析

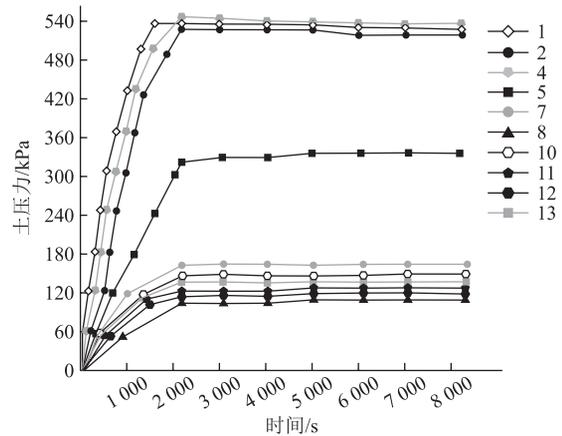
4.1 应力变化特征分析

4.1.1 基底应力随时间变化特征

监测开挖卸荷前后基底竖向、水平应力的变化,得到路堑开挖前后基底土压力随时间变化曲线,如图 2 所示。



(a) 模型开挖前土压力随时间变化曲线



(b) 模型开挖后土压力随时间变化曲线

图 2 基底土压力随时间变化曲线图

由图 2 可知:

(1) 深挖路堑开挖前后,土压力随时间和加速度的变化有明显的阶段性特征。随着加速度从 0 逐级加载至 120g(即 0~2 000 s 加速阶段),土压力逐渐增加;2 000 s 以后为固结阶段,土压力最终趋于稳定。

(2) 开挖卸荷后 2 号、5 号、8 号、11 号与 12 号竖向土压力有明显减小,表明路堑基底的竖向应力主要为岩土体的自重应力,竖向应力的减少是开挖卸荷引起的。

(3) 开挖卸荷后,7 号土压力传感器开挖前为 347.26 kPa,开挖后为 163.52 kPa,减少 183.74 kPa;4 号土压力传感器开挖前约为 503.35 kPa,开挖后为

412.13 kPa,减少91.25 kPa;1号土压力传感器开挖前为563.27 kPa,开挖后为532.29 kPa,减少30.98 kPa。水平应力并不随深度增加而增大。

(4)坡体开挖卸荷作用引起的基底应力重新分布在一定范围内进行。在一定的基底深度内,卸荷作用的影响随深度的增加逐渐减弱,超出某个临界最大深度,岩层将不受开挖卸荷的影响。

4.1.2 开挖前后水平应力与竖向应力变化

基底不同深度下岩体的竖向应力和水平应力均受到开挖卸荷的影响,其相对大小关系也发生变化。为探究基底不同深度下应力变化关系,将坡体开挖前后,模型在120g离心加速下,对基底左侧4个土压力测得的水平应力与相同深度下的竖向应力数据进行处理分析,得到基底不同深度下水平应力与竖向应力的大小关系,如图3所示。

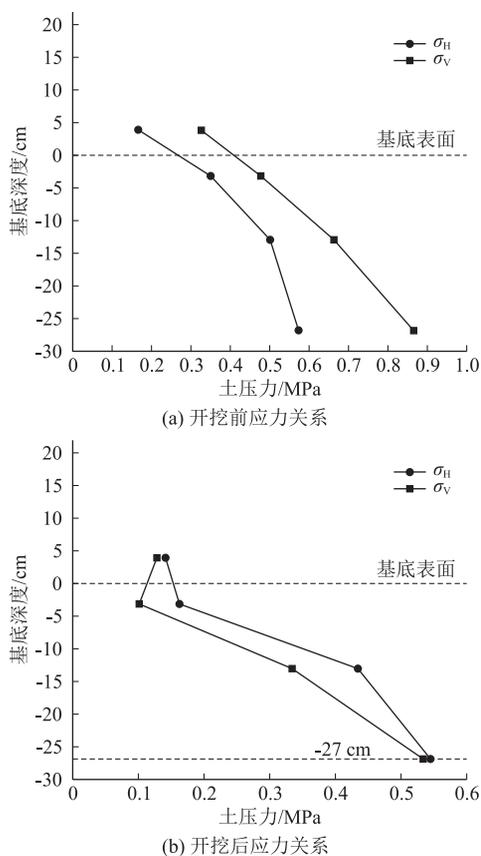


图3 基底不同深度下应力相对关系图

由图3可知,在路堑坡体开挖前,基底不同深度下的竖向应力大于水平应力,侧压力系数为0.6~1.0。路堑坡体开挖后,基底不同深度的侧压力系数有明显变化;基底深度为-4cm时,侧压力系数约为1.56;基底深度为-14cm时,侧压力系数约为1.31;基底深度为-27cm时,侧压力系数为1.02。开

挖之后基底的侧压力系数增大,随着深度的增加,侧压力系数增加值减小,最终与未开挖时的初始侧压力系数相同。路堑坡体开挖卸荷,引起基底应力重新分布,水平应力增加,基底应力重新平衡后竖向应力小于水平应力。开挖卸荷影响不会超出某深度范围。在该深度范围外,基底的侧压力系数趋于边坡未开挖卸荷的原始状态。

4.2 位移变化特征分析

4.2.1 路堑边坡位移

模型边坡开挖卸荷且在120g离心加速度下,左侧边坡坡顶的水平位移量约为15.6mm,坡体中部的水平位移量约为12.5mm,路堑坡脚位置的水平位移量约为8.7mm。右侧边坡坡顶位移量约为13.5mm,坡体中部的水平位移量约为10.5mm,坡脚处几乎为7.8mm。开挖前后,路堑边坡水平位移坡顶最大,坡脚最小,呈现出随开挖深度逐渐递减的规律。

4.2.2 路堑基底位移

模型开挖卸荷且在120g离心加速度下稳定后,通过对布置在基底地侧面的位移标记点前后位置进行测量计算,得到基底不同深度开挖前后的位移变形矢量图,如图4所示。

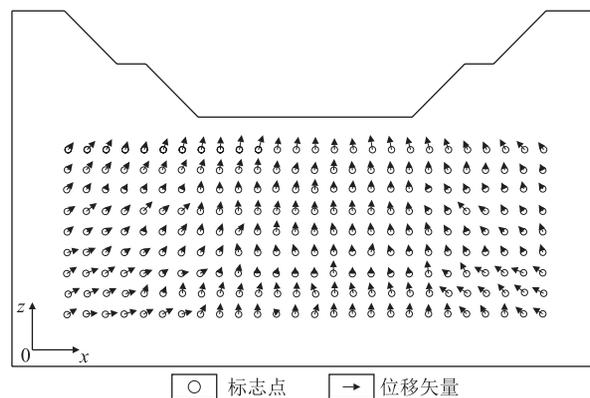


图4 基底位移变形矢量图

由图4可知,基底中部的竖向位移矢量最大,表明基底中部的上拱变形较大。基底中部的位移矢量随着基底深度的增加逐渐减小。基底两侧,埋深较浅时位移矢量小于基底中部;埋深达到一定深度后,位移矢量以水平方向位移为主。模型基底的位移主要集中在基底30cm的深度范围内。在这个深度范围内,基底的应力状态特征为水平应力大于竖向应力。在一定深度范围内,基底的应力状态的变化对基底变形特征有一定的影响。

5 结论

通过对离心模型试验结果进行分析,总结深路堑坡体开挖后基底应力场变化特征与位移变化特征,得出以下结论:

(1)深路堑坡体开挖后改变了基底应力场状态。开挖前,基底竖向应力大于水平应力,随基底深度的增加而增加;开挖后,基底下一定深度范围内的水平应力大于竖向应力,该深度范围内的侧压力系数 $\lambda > 1.0$,且影响深度范围与开挖量成正比。

(2)基底中部上拱变形量最大,位移矢量随着基底埋深的增加而逐渐减小。埋深达到一定深度后,位移矢量以水平方向位移为主。

(3)基底埋深一定深度范围内,水平应力大于竖向应力,侧压力系数 $\lambda > 1.0$,为深路堑基底上拱主要变形区,基底水平应力与竖向应力的大小关系是导致深路堑基底产生上拱变形的关键因素。

参考文献:

- [1] 司文明,庞永海. 川中红层泥岩高速铁路基底上拱病害处理设计[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(3): 96-99.
SI Wenming, PANG Yonghai. The Design of Disease Treatment for the Upheaval of Subgrade of High-speed Railway on Red Bed Mudstone in Central Sichuan [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3): 96-99.
- [2] 邱恩喜,谢强,赵文,等. 红层软岩边坡岩体工程特性研究[J]. 地质与勘探, 2007, 43(5): 96-100.
QIU Enxi, XIE Qiang, ZHAO Wen, et al. Research on Engineering Characteristics of Soft Rock Slope Mass in Red Beds [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(5): 96-100.
- [3] 叶世斌. 川渝地区红层软岩路堑边坡变形机理及对策[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(5): 67-72.
YE Shibin. Deformation Mechanism and Countermeasures of Red-bed Soft Rock Cutting Slopes in Sichuan and Chongqing Area [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(5): 67-72.
- [4] 向章波,张家铭,周晓宇,等. 基于Slide的某红层路堑边坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 90-95.
XIANG Zhangbo, ZHANG Jiaming, ZHOU Xiaoyu, et al. The Slope Stability Analysis of Red Bed Based on Slide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 90-95.
- [5] 陈明浩,赵晓彦,张广泽,等. 高速铁路路堑基底上拱变形危险性评价方法研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(10): 31-36.
CHEN Minghao, ZHAO Xiaoyan, ZHANG Guangze, et al. Research on the Risk Assessment Method of Subgrade Heaving Deformation of High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(10): 31-36.
- [6] 王冲,王起才,张戎令,等. 无砟轨道高速铁路路堑基底上拱病害成因分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 252-256.
WANG Chong, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Analysis of Arch Disease of Ballastless Track High-speed Railway [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12): 252-256.
- [7] 杨吉新,马旭超,刘前瑞. 关于成渝高铁路堑基底上拱问题的探讨[J]. 铁道建筑, 2016, 56(8): 112-115.
YANG Jixin, MA Xuchao, LIU Qianrui. Exploring on Subgrade Swelling of Chengdu-Chongqing High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2016, 56(8): 112-115.
- [8] 钟志彬,李安洪,邓荣贵,等. 高速铁路红层软岩路基时效上拱变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 327-340.
ZHONG Zhibin, LI Anhong, DENG Ronggui, et al. Study on Time-dependent Upheaval Deformation Mechanisms of Red-bed Soft Rock Subgrade of High-speed Railways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 327-340.
- [9] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 92-97.
BAO Chenggang. The State and Prospect of Centrifugal Model Test in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(6): 92-97.
- [10] 周小文,濮家骝. 隧洞结构受力及变形特征的离心模型试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(8): 110-112, 116.
ZHOU Xiaowen, PU Jialiu. Centrifuge Model Test Study of the Earth Pressure and Deformation of Tunnel Lining [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(8): 110-112, 116.
- [11] 王玉峰,程谦恭,黄英儒. 不同支护模式下黄土高边坡开挖变形离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1032-1046.
WANG Yufeng, CHENG Qiangong, HUANG Yingru. Centrifuge Tests on Excavation of High Loess Slope with Different Reinforcement Modes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1032-1046.
- [9] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].
TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].
- [10] GB50111-2006 铁路工程抗震设计规范[S].
GB50111-2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering [S].

(上接第69页)

2008, 25(6): 61-66.

- [8] 铁道第二勘察设计院. 铁路工程设计技术手册·隧道[K]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
The Second Railway Survey and Design Institute. Railway Engineering Design. Tunnel [K]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.