

Study on Support Structures and Control Technology of Deformation of Tunnel under the Loess Landslide

Gaofei Feng^{1*}, Yusuo Wang²

¹China Railway Design Corporation, Tianjin

²School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: *soar_fgf@163.com

Received: Jan. 7th, 2019; accepted: Feb. 6th, 2019; published: Feb. 13th, 2019

Abstract

The existence of landslide has brought great challenges to the construction and safe operation of the tunnel. The paper takes the tunnel of passenger dedicated railway under the loess landslide as the research object, and a three-dimensional numerical model has been established with MIDAS/GTS. The influence of the construction scheme of "double side wall drift-reinforced composite lining structure" on the deformation of surrounding rock and the stability of landslide was discussed with or without the influence of heavy rainfall. In addition, combined with the monitoring results of the convergence deformation in the cave and the settlement of the surface outside the tunnel, the construction scheme of "double side wall drift-reinforced composite lining structure" has good control effect on the deformation of the surrounding rock. The loess landslide body has less been affected by the tunnel excavation. The scheme can provide reference for the design and construction of tunnels with similar engineering geological conditions.

Keywords

Tunnel of Passenger Dedicated Railway, Loess Landslide, Deformation Control, Numerical Simulation, Monitoring Measurement

下穿黄土滑坡体隧道支护体系与变形控制技术研究

冯高飞^{1*}, 王玉锁²

¹中国铁路设计集团有限公司, 天津

*通讯作者。

²西南交通大学土木工程学院, 四川 成都
Email: soar_fgf@163.com

收稿日期: 2019年1月7日; 录用日期: 2019年2月6日; 发布日期: 2019年2月13日

摘要

滑坡的存在给隧道的建设及安全运营带来了巨大挑战, 本文以下穿黄土滑坡体客运专线铁路隧道为研究对象, 运用MIDAS/GTS建立三维数值模型, 研究了有无强降水影响时, “双侧壁导坑-加强型复合式衬砌结构”施工方案对围岩变形及滑坡稳定性的影响, 同时结合现场对洞内收敛变形与洞外地表沉降的监测结果, 得知“双侧壁导坑-加强型复合式衬砌结构”施工方案对围岩的变形起到了很好的控制作用, 上部滑坡体受隧道开挖的影响较小, 该方案可为类似工程地质条件的隧道设计和施工提供参考。

关键词

客运专线铁路隧道, 黄土滑坡, 变形控制, 数值模拟, 监控量测

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 随着国民经济水平的不断提高和科学技术水平的快速发展, 我国客运列车的行车速度不断地提高, 这也对行车线路的技术指标提出了更高的要求, 而在中西部地区约有三分之二的国土为高山丘陵地形, 这就迫使铁路线路有时必须穿越山区滑坡体, 因此, 开展对滑坡地质灾害地区铁路隧道修建技术的研究具有重要的现实意义。

目前, 关于滑坡-隧道体系相互作用的研究已取得了一些成果, 周德培[1]等通过对存在滑坡灾害的30座隧道的调查, 认为滑坡面与隧道的相对位置是影响隧道结构稳定性的主要原因。罗兴华[2]等通过对运营多年的大准铁路南坪隧道的调查研究, 对隧道下穿滑坡段的病害处理提出了整治措施。而随着数值模拟、监控量测和模型试验等技术被广泛引入工程领域, 诸多学者开始运用上述方法着手研究, 朱苦竹[3]对下穿滑坡段公路隧道的变形进行了监测, 详细分析了滑坡与隧道之间的相互作用的规律, 揭示了滑坡与隧道相互作用的机理; 张鲁新[4]通过现场勘测、滑坡监测与室内试验对东荣河滑坡进行了研究, 分析了造成滑坡蠕动的的原因和隧道变形的特征, 认为作用于隧道的蠕动挤压力具有周期性、间隙性的双重特征。上述研究对于滑坡-隧道的相互作用关系已经形成了一定的认识, 但针对隧道开挖工法对滑坡稳定性的研究仍然较少。本文是以宝兰客运专线铁路隧道为例, 通过数值模拟和现场监控量测的方法, 分析了“双侧壁导坑-加强型复合式衬砌结构”施工方案对变形控制和滑坡稳定性的影响, 以此为隧道的顺利施工和安全运营提供可靠依据。

2. 隧道工程概况

宝兰客运专线是国家中长期铁路网规划中徐兰客运专线的西段, 也是国家铁路“四纵四横”客运专线网的重要组成部分。本文研究隧道是宝兰客运专线的重难点工程之一, 受周边环境及滑坡体的影响,

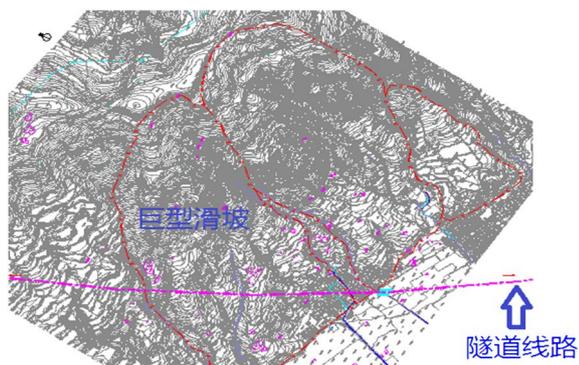


Figure 1. Plane relationship of tunnel and landslide

图 1. 隧道 - 滑坡平面关系图

线路以隧道方式穿越了黄土梁峁区, 隧道 - 滑坡平面关系如图 1 所示, 其中滑坡堆积体底面距离拱顶最近约为 15 米, 这对隧道施工及后期的安全运营带来了巨大的挑战。本文即以该区段隧道为例, 对隧道下穿黄土滑坡的修建技术进行研究。

3. 数值模拟计算

3.1. 模型概况

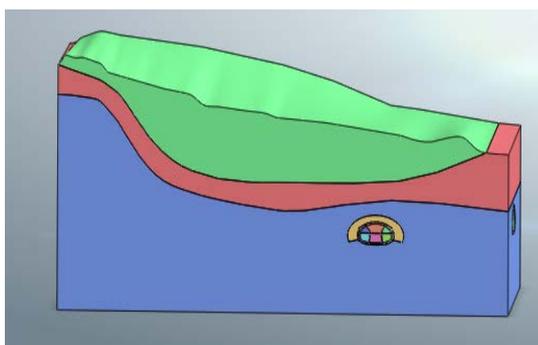


Figure 2. Model of numerical simulation

图 2. 计算模型图

本次模拟以隧道下穿黄土滑坡段为研究对象, 根据已有的地形平面图和地层钻孔取样资料确定滑坡段的地形及地层界线, 地层从上至下主要为黏质黄土、强风化泥岩和弱风化泥岩。运用 MIDAS/GTS 建立三维数值模型(如图 2), 模型的尺寸为 $150\text{ m} \times 310\text{ m} \times 137/90.2\text{ m}$ (X 轴 \times Y 轴 \times Z 轴, 137 m 和 90.2 m 分别为 Z 向的最高点和最低点), 其中, 滑坡纵轴方向为 Y 轴, 垂直于滑坡纵轴方向为 X 轴, 竖直方向为 Z 轴。隧道采用“双侧壁导坑 - 加强型复合式衬砌结构”的施工方案, 二次衬砌分两层施做, 第一层为 30 cm 厚 C40 模筑格栅混凝土, 第二层为 50 cm 厚 C40 钢筋混凝土, 衬砌结构方案如图 3 所示。

3.2. 参数选取

模型岩土层和支护体系的物理力学参数主要依据前期工程勘察设计资料与现行的《铁路隧道设计规范(TB10003-2016)》[5]进行选取。同时将初期支护结构视为单一材料, 对钢架和混凝土材料的弹性模量进行强度折减, 锚杆等支护手段通过改善加固区围岩的力学参数来确定, 模型及支护结构的物理力学参数如表 1 所示。

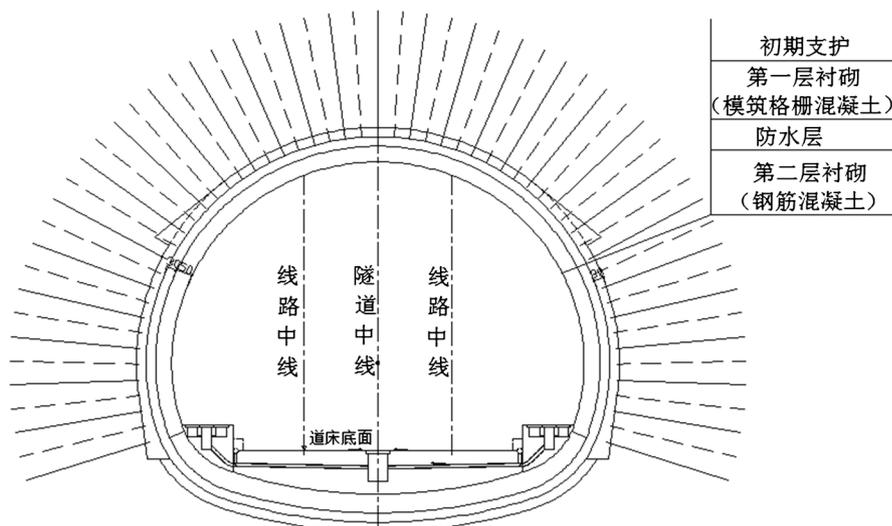


Figure 3. Reinforced composite lining structure
图 3. 加强型复合式衬砌结构

Table 1. Mechanical parameters of model and support structure

表 1. 模型及支护结构物理力学参数

材料名称	弹性模量 (GPa)	泊松比	重度 (kN/m ³)	内摩擦角 (°)	黏聚力 (MPa)	饱和重度 (MPa)	孔隙比	渗透系数 (m/d)
黏质黄土(滑坡体)	0.016	0.3	15.6	26.5	0.02	16	0.67	0.0001
强风化泥岩	0.7	0.43	22	20	0.06	22.5	0.5	0.017
弱风化泥岩	1.0	0.4	24	23	0.1	24	0.3	0.01
钢结构支撑	200	0.3	78.5	-	-	-	-	-
初支混凝土	32	0.2	23	-	-	-	-	-
二衬混凝土	33.5	0.2	25	-	-	-	-	-
围岩加固区	1.5	0.3	24.5	30	0.4	24.5	-	-

3.3. 结果分析

运用双侧壁导坑的施工方法进行隧道的模拟开挖, 采用加强型复合式衬砌结构的支护体系, 作出隧道开挖完成后, 隧道-滑坡体系的竖直位移云图(如图 4), 水平位移云图(如图 5)和地层塑性区分布图(如图 6)。

由图 4 可以看出, 隧道施加第二层模筑混凝土后, 底部拱起的最大位移为 11.1 mm, 拱顶处的下沉值为 13.0 mm; 隧道上方地表的沉降约为 4.9 mm。由图 5 可以看出, 左拱腰和右拱腰最大水平位移为 7.0 mm 和 5.3 mm。由地层塑性区分布图(图 6)可以看出, 塑性区主要集中出现在开挖洞室周围, 滑坡体区域未出现塑性破坏, 计算过程中也没有出现计算不收敛现象, 根据相关有限元计算研究资料与工程案例[6][7][8][9], 可以判定该滑坡体处于稳定状态并且具有足够的安全储备。由此说明, “双侧壁导坑-加强型复合式衬砌结构”的施工方案在施工阶段可有效控制下穿黄土滑坡段隧道的变形, 保证滑坡体的安全稳定。

此外, 考虑到强降水作用势必会加剧隧道开挖对滑坡体的扰动, 在此模拟了岩土层在饱水状态时隧道的开挖过程。作出隧道开挖完成后地层的塑性区分布图(如图 7 所示), 由图可以看出, 地层在饱水状态下, 滑坡体前段发生了塑性抗拉破坏, 但没有出现贯穿整个滑坡体的塑性破坏区, 也没有出现明显的滑

动破坏现象。隧道结构的变形也均未超过规定限值, 由此看来, 下穿滑坡段隧道即使在水压力和滑坡体偏压的共同作用下, 隧道结构仍处于安全状态。在饱水状态下, 隧道施工时滑坡体也处于稳定状态, 因此推荐将“双侧壁导坑-加强型复合式衬砌结构”的施工方案作为隧道下穿黄土滑坡段的优选方案。

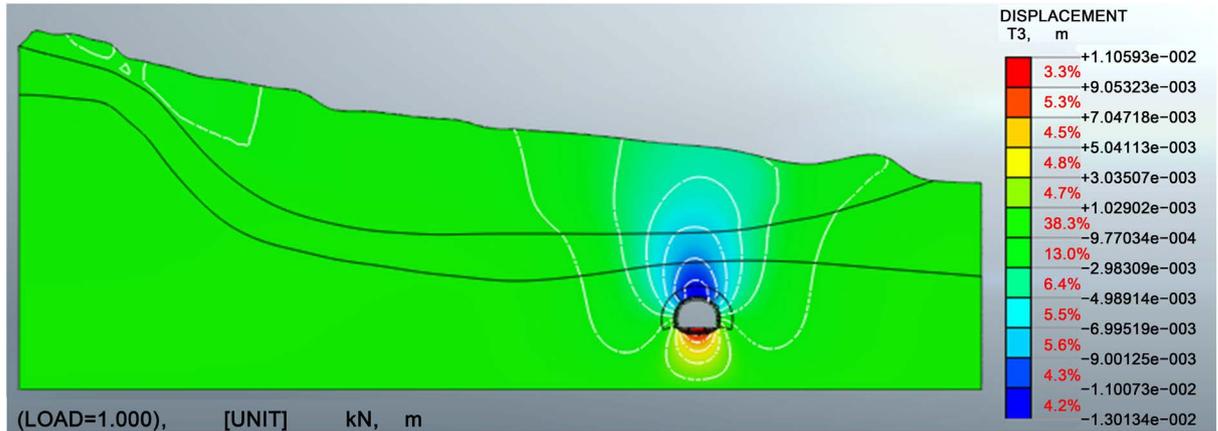


Figure 4. Cloud chart of vertical displacement (m)
图 4. 竖直位移云图(m)

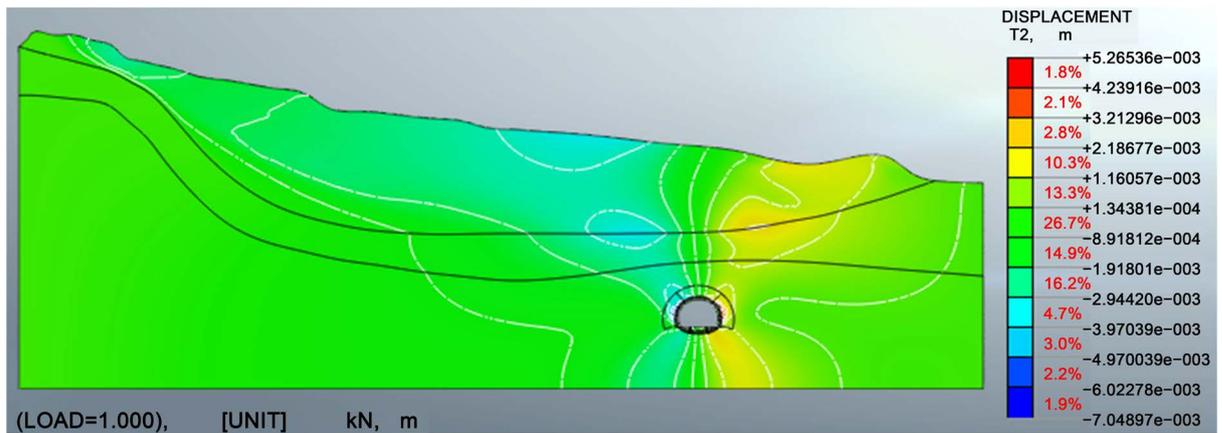


Figure 5. Cloud chart of horizontal displacement (m)
图 5. 水平位移云图(m)

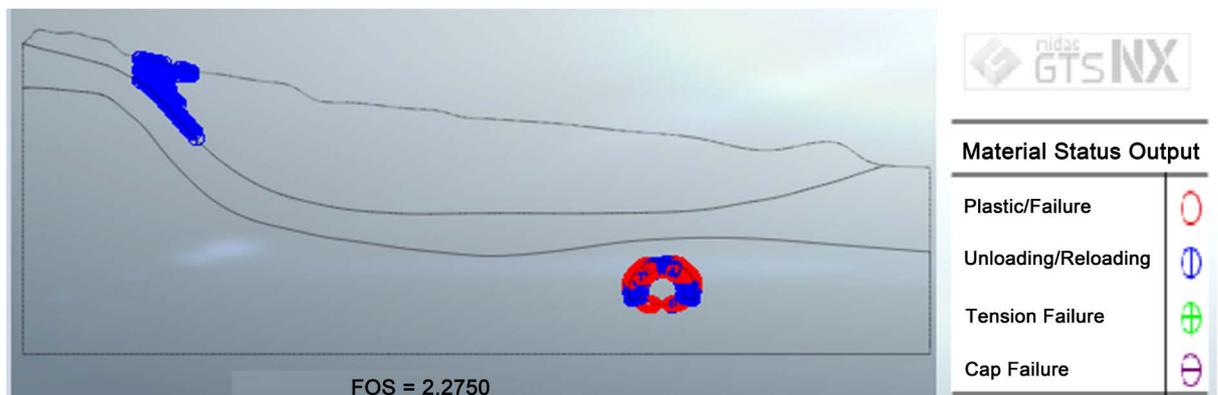


Figure 6. Distribution diagram of plastic zone
图 6. 地层塑性区分布图

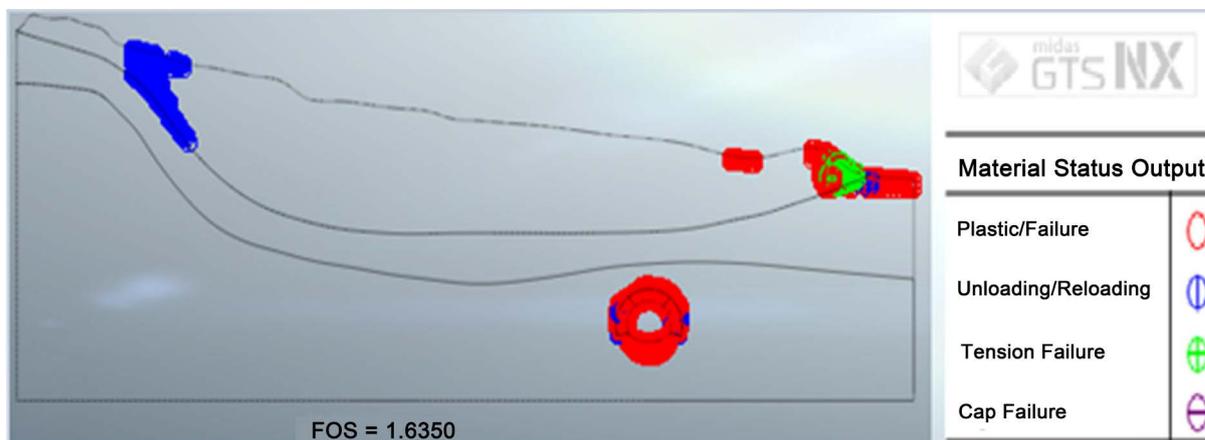


Figure 7. Distribution diagram of plastic zone in saturated state
图 7. 饱水时地层塑性区分布图

4. 现场监控量测

根据双侧壁导坑法的工法特点, 参照《铁路隧道监控量测技术规程》[10]布置洞周收敛测线(如图 8), 通过高精度全站仪进行量测, 主要用于监测隧道洞周收敛变形和拱顶沉降。此外, 对隧道施工影响范围内的地表变形情况也进行分析, 以典型断面处的地表沉降值为研究对象, 共布置了 7 个测点, 如图 9 所示。

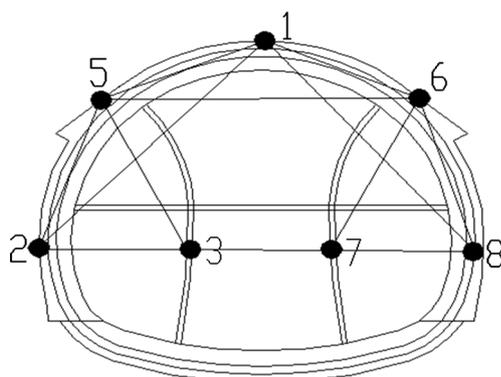


Figure 8. Schematic diagram of monitoring points for tunnel crown settlement and convergence
图 8. 隧道拱顶下沉与洞周收敛测点(线)布置示意图

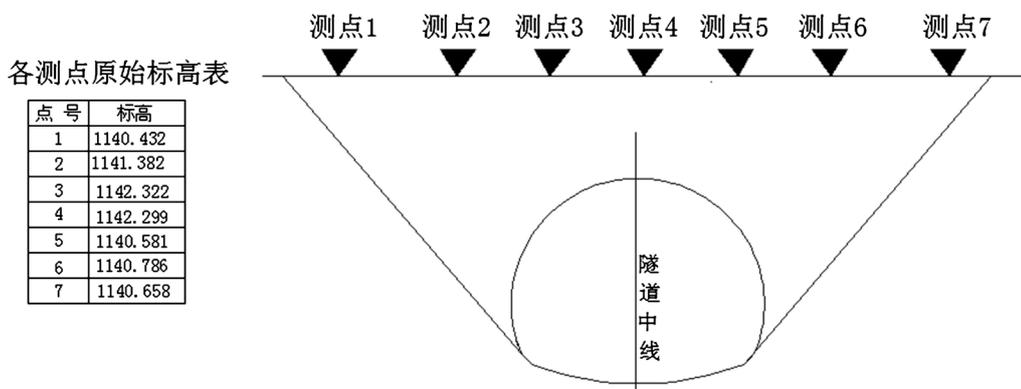


Figure 9. Schematic diagram of monitoring points for surface deformation
图 9. 地表变形测点布置示意图

4.1. 水平收敛监测结果

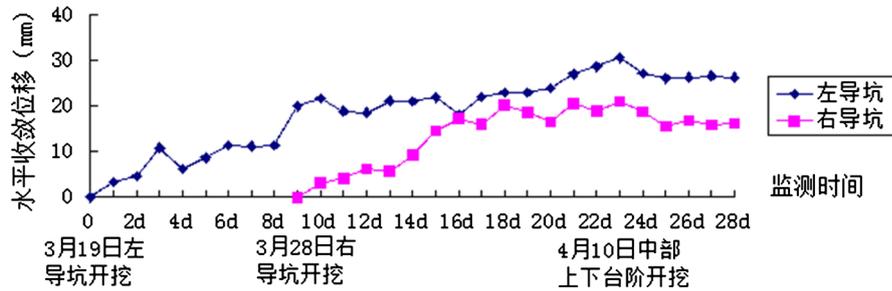


Figure 10. Time-history curve of horizontal convergence for the caves of both sides (mm)

图 10. 左、右导坑水平收敛时程曲线(mm)

对隧道左、右导坑水平收敛位移进行监测(图 8 中 2~3 测点和 7~8 测点), 时程曲线如图 10 所示。由图可知, 在左导坑(先行施工坑道)开挖并施作初期支护以后, 位于临时支撑的测点 2~3 之间的水平收敛值呈持续增长的趋势; 在右导坑(后行施工坑道)开挖并施加初期支护以后, 测点 2~3 之间的水平收敛位移突然增大, 之后逐渐趋于平稳, 此后, 与右导坑测点 7~8 之间的水平收敛趋势大致相同。在上下台阶开挖后, 左、右导坑的水平收敛位移均减小。在左导坑开挖 25 天后, 左、右导坑的水平收敛值趋于稳定, 收敛速度均不大于 0.2 mm/d, 最终左导坑的水平收敛位移值为 26.3 mm, 右导坑的水平收敛位移值为 16.2 mm。

4.2. 拱顶下沉监测结果

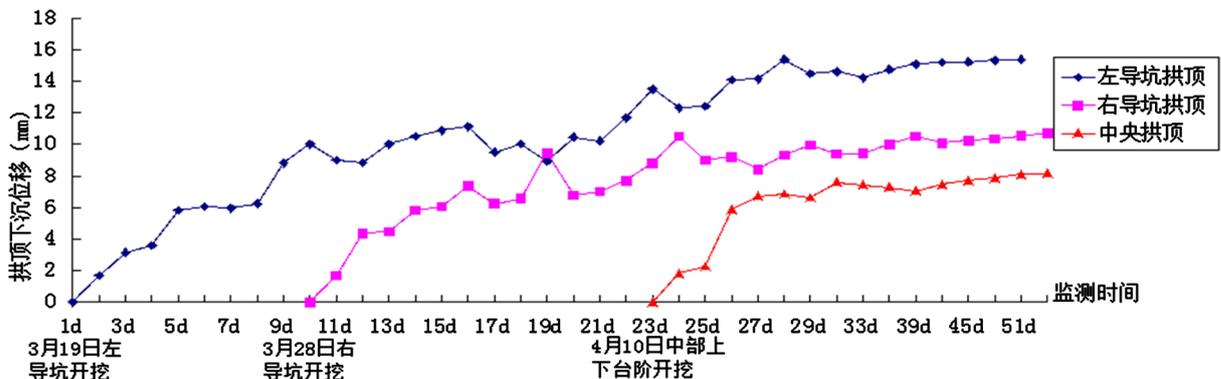


Figure 11. Time-history curve of tunnel crown settlement with monitoring measurement (mm)

图 11. 实际监测拱顶下沉时程曲线(mm)

对左、右导坑拱顶和中央拱顶的下沉量进行监测(图 8 中 5 测点、6 测点和 1 测点), 时程曲线如图 11 所示, 由图可知, 左导坑(先行施工坑道)的拱顶下沉位移大于右导坑(后行施工坑道)与中央拱顶下沉位移, 下沉时态曲线的波动也最明显。在右导坑与中央岩土体进行开挖时, 左导坑拱顶下沉位移增长较快, 最大下沉速率为 2.6 mm/d。中部上下台阶开挖完成 5 天后, 拱顶下沉速度逐渐放缓, 此后变形量均未超出 0.2 mm/d, 此时可认为变形已达到稳定, 最终拱顶(测点 5)的最大下沉量为 15.3 mm。

4.3. 地表沉降监测结果

对地表测点的沉降值进行监测(测点布置如图 9 所示), 作出不同时期典型断面位置处的地表沉降分布曲线, 如图 12 所示。在隧道开挖前, 地表已出现小幅下沉, 其中测点 7 的沉降量最大, 沉降值为 8 mm,

这与上一进尺隧道的施工顺序有关。在左、右导坑开始开挖以后, 隧道中线两侧地表沉降量逐渐增大。在中部上下台阶开挖后, 左右两侧的地表沉降都受到明显的影响, 右导坑(初期支护已施做完成)上方地表的沉降明显增大, 且最大沉降速度达到 2.8 mm/d。在隧道断面处初期支护结构闭合成环后, 隧道中心线上方地表(测点 4)的沉降位移继续增大, 而左侧地表沉降变化较小, 右侧地表的沉降仍在持续。在二衬施做完成后, 各测点的地表沉降值基本趋于稳定。到二衬施做完成后一周, 各测点地表下沉速度均小于 0.1 mm/d, 地表沉降达到稳定, 最大沉降位移为 42.5 mm, 位于隧道断面中心线的测点 4, 但未超过允许值。

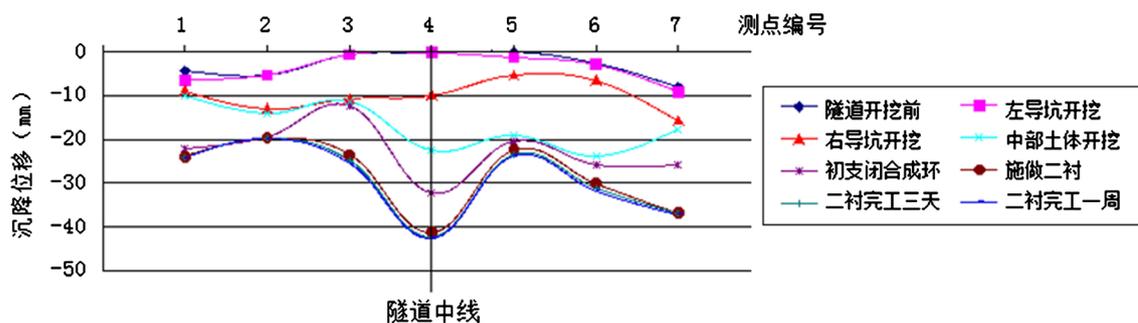


Figure 12. Distribution curve of surface deformation (mm)

图 12. 地表沉降分布曲线(mm)

通过对监测结果的分析 and 比较, 各指标均未超过允许值。目前, 宝兰客专已正式开通运营, 即使在降水集中的夏季, 隧道结构仍处于安全状态, 上部滑坡体也未见异常, 因此, 可认为下穿黄土滑坡体隧道采用的“双侧壁导坑-加强型复合式衬砌结构”施工方案是合理可靠的。

5. 结论

通过采用数值计算和现场监测的方法, 分析了下穿黄土滑坡体隧道施工对围岩变形和滑坡稳定性的影响, 主要得出以下结论:

1) 通过数值计算可以看出, 隧道开挖引起围岩向隧道中心的收敛变形, 隧道上方的土体出现下沉, 滑坡前缘与后缘的岩土体有向隧道中心的变形, 当滑坡体处于饱水状态时, 滑坡体受隧道的开挖影响, 局部出现了塑性破坏, 但没有出现明显的滑动破坏现象, 结构仍处于安全状态。

2) 通过对洞内收敛变形与洞外地表下沉监测分析可知, 隧道在施工过程中, 初期支护的收敛变形均在允许范围之内; 闭合成环后, 收敛变形也趋于稳定; 后期运营后, 隧道结构处于安全状态。由此可见, 隧道采用的“双侧壁导坑-加强型复合式衬砌结构”施工方案是可靠的, 可以对下穿黄土滑坡段软弱围岩的变形起到较好的控制作用, 可为类似工程地质条件的隧道设计和施工提供参考。

参考文献

- [1] 陶志平, 周德培. 滑坡地段隧道变形的地质力学模型及工程防治措施[J]. 铁道工程学报, 2006(1): 61-66.
- [2] 罗兴华, 兰晓, 舒中文, 等. 大准铁路南坪隧道-滑坡体系变形特征及处治技术[J]. 铁道建筑, 2018, 58(10): 55-59.
- [3] 朱苦竹, 朱合华. 滑坡与隧道相互作用机理实例分析[J]. 地下空间与工程报, 2006, 2(5): 809-817.
- [4] 张鲁新, 周德培. 蠕动滑坡成因及隧道变形机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 18(2): 217-221.
- [5] 中铁二院工程集团有限责任公司. TB10003-2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [6] 帅红岩, 韩文喜, 赵晋乾. Midas/GTS 软件在边坡三维稳定分析中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(3): 104-107.

- [7] 柳林超, 梁波, 刁吉. 基于 ANSYS 的有限元强度折减法求边坡安全系数[J]. 重庆交通大学学报, 2009, 28(5): 899-901.
- [8] 任志丹, 吕力行. 基于 Midas/GTS 的边坡稳定性分析及加固[J]. 研究勘察科学技术, 2015(1): 12-14.
- [9] 杨超. 大断面软岩隧道近距离下穿滑坡段支护结构及围岩变形控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [10] 中国铁路总公司. Q/CR 9218-2015 铁路隧道监控量测技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org