

复杂条件下连拱隧道洞口塌方成因及加固技术

马晓朋¹, 陈秋南¹, 谢发亮², 赵柳¹, 李腾飞¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国中铁十六局集团有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 栎斜隧道是宁波象山港大桥公路中的一座双向四车道连拱隧道, 出口段存在明显的偏压现象, 围岩较破碎, 地质条件复杂. 左洞出口段遇大雨侵蚀后围岩变形突然增大, 变形速率加快, 致使洞口出现塌方. 通过对塌方段主客观原因的分析, 采用洞口刷坡、打设长管棚并喷射混凝土的综合方法加固处理. 同时在处理段洞内增设监测断面进行周边收敛位移、拱顶下沉和地表沉降监测等监控手段, 并与数值模拟结果对比分析. 监控量测和数值模拟结果基本相同, 表明处治措施得当, 隧道洞口围岩基本趋于稳定, 效果良好, 为类似工程提供参考.

关键词: 连拱隧道塌方成因; 浅埋偏压; 雨水侵蚀; 长管棚; 刷坡

中图分类号: U452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2014)01-0042-05

Portal section collapse reason and reinforcement technology of complex conditions double-arch tunnel

MA Xiao-peng¹, CHEN Qiu-nan¹, XIE Fa-liang², ZHAO Liu¹, LI Teng-fei¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. China Railway No. 16 Engineering Group Company Limited, Huzhou 313000, China)

Abstract: Lixie Tunnel is located in Ningbo, China. which is a multi-arch tunnel of bidirectional four roadways on Xiangshangang port bridge road. There are complex geologic conditions, broken surrounding rock and obvious unsymmetrical pressure phenomenon. The surrounding rock deformation of the left hole of portal section was suddenly becoming increased after heavy rain erosion, accelerated rate of deformation, and collapse appeared. Based on the analysis of the objective and subjective of collapse reason, the brush slope treatment, long pipe shed methods and sprayed concrete were designed for reinforcement treatment, at the same time, a new monitoring section was designed in the collapse section of the left hole to observe convergence displacement, vault subsidence and surface subsidence, and treatment construction process of tunnel collapse section was simulated by FLAC. The comparative results show that the monitoring measurement and numerical simulated results is same, the surrounding rock of portal section is basically stabilized after treatment and get good results. It provide a reference for similar projects.

Key words: collapse reason of double-arch tunnel; shallow unsymmetrical pressure; rain erosion; long pipe shed; brush slope

高速公路受场地条件以及地质条件的限制,特别是桥隧相连处接线困难,连拱隧道这一结构形式应运而生并得到了广泛应用.连拱隧道与分幅独立隧道比较,克服了地形和展线的限制,具有与公路连线容易、节省占地、保护环境、节省工程投资、外形美观等诸多优点^[1-2].

连拱隧道一般跨度大,采用爆破、分步法开挖方法对围岩扰动次数多,埋深较浅、围岩软弱破碎、偏压严重^[3].隧道塌方是隧道施工中常见的事故,如处治不当,不仅会延误工期,提高造价,甚至会影响后续施工,遗留工程质量隐患^[4].

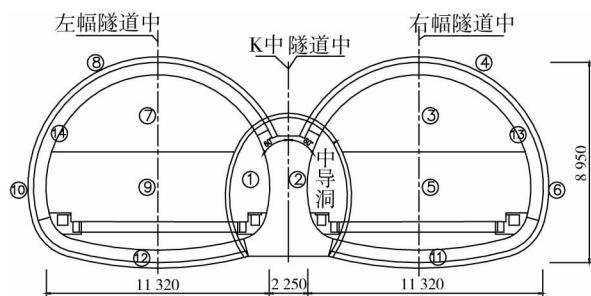
在宁波栎斜隧道施工过程中,2011年11月14日隧道左洞出口发生了一次塌方,为确保在清塌过程中的安全及围岩的稳定,项目部结合相关案例^[5-6]及现场情况经过综合考虑,对洞口进行刷坡处理并采用长管棚进行加固,喷射混凝土加固洞口刷坡段围岩.经过严格施工,安全通过塌方地段,达到了预期目的.

1 工程概况及施工方法

栎斜隧道位于宁波横溪镇栎斜村栎斜水库处,呈近南北向展布,是宁波象山港大桥公路连接线中的一座双向四车道连拱隧道,出口段埋深浅,地质条件复杂,存在明显的偏压现象.隧道左线起讫止桩号为 ZK6+403~ZK6+535,全长132 m;右线起讫止桩号为 YK6+401.2~YK6+533.2,全长132 m,属短隧道.隧道平面线形左、右线均处于直线段.隧道纵面左、右线全长均处于凸型竖曲线上.路面左、右线全长均为2%单向横坡.单洞建筑限界净宽10.75 m、净高5.0 m.隧道区地形较简单,山顶浑圆,山地冲沟发育.山体总体呈北东向.最高海拔79.7 m,最低海拔0.5 m,相对高差79.2 m,属丘陵地貌.地表植被发育,主要为杂木及杂草.隧道区节理裂隙较发育,节理杂乱,局部充填泥质.节理主要有3组:其产状为: $0^{\circ}\angle 72^{\circ}$, $70^{\circ}-90^{\circ}\angle 60^{\circ}-65^{\circ}$, $150^{\circ}\angle 30^{\circ}$.隧道地形坡角在 22° 左右.其中心线与地形等高线正交,围岩富水性不均一,透水性较差.隧道上部山体呈一明显的斜坡,使隧道处于偏压状态.隧道区基岩出露情况较差,大部分地区被第四系地层及全、强风化岩层所覆盖.

栎斜隧道开挖主要采用钻爆法,软弱围岩段也可采用机械开挖或人工开挖,二次衬砌混凝土采用整体式液压模板台车浇筑,施工过程中严格遵循

“短进尺、弱爆破、快封闭、勤量测”的指导原则,严格控制循环进尺和爆破震动速度,采用中导洞台阶法施工,复合式衬砌段施工时严格按照新奥法的原则进行.基于偏压的地质情况,采用中导洞拓展法(先中导洞施工,后2主洞分上下台阶法施工),具体施工工序如图1所示.



①中导洞开挖;②中隔墙浇筑;③右洞上台阶开挖;④右洞上台阶支护;⑤右洞下台阶开挖;⑥右洞下台阶支护;⑦左洞上台阶开挖;⑧左洞上台阶支护;⑨左洞下台阶开挖;⑩左洞下台阶支护;⑪右洞仰拱施工;⑫左洞仰拱施工;⑬右洞二次衬砌;⑭左洞二次衬砌.

图1 栎斜隧道设计断面与施工工序

2 现场监测结果及塌方原因分析

2.1 监控量测

栎斜隧道进口中导洞施工过程中,因山体偏压,施工时右洞先行.本文介绍洞口段的6+520地表沉降断面,左洞 ZK6+525 断面.

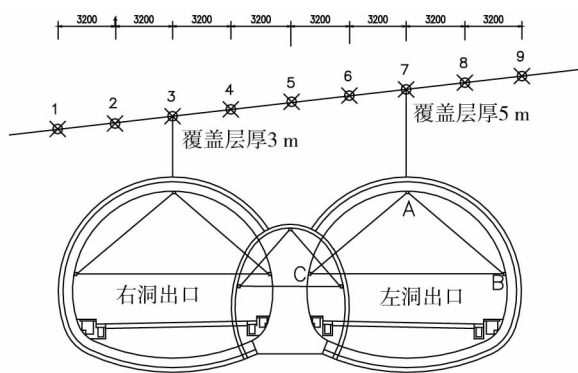


图2 监控量测点布置

2.1.1 地表沉降量测

11月10日在隧道出口附近6+520断面布置了9个地表沉降观测点.根据规范要求,测点布置在由中隔墙顶地表点向左右延伸各1.5倍隧道跨度距离范围之内.现选取能明显反映地表沉降的5个观测点进行统计分析,如图3所示.

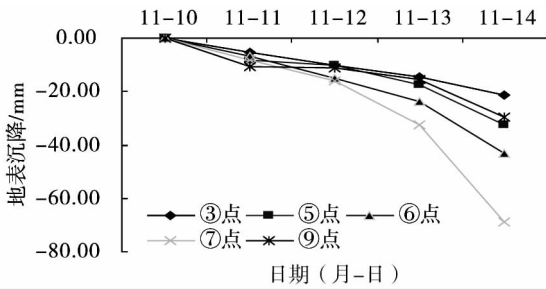


图3 6+520断面地表沉降量测结果

从图3可以看出,各测点沉降在11月13日以前一直缓慢发展,各测点累计沉降量在允许值范围内.但从11月13日开始,沉降速率明显增快,尤其是图3中⑥和⑦的2个测点,截至11月14日左右,累计沉降值达到68.56 mm和45.34 mm.隧道出口仰坡段多处出现裂缝,裂缝宽度约10 cm,深度约45 cm,并有发展趋势.

2.1.2 洞内收敛位移

隧道围岩应力状态变化的最直观反映是洞内周边收敛和拱顶下沉,可以根据收敛位移变化速率和累积收敛值来判断围岩的稳定程度.在左洞ZK6+525断面量测隧道周边收敛值及拱顶下沉值.如图4所示.

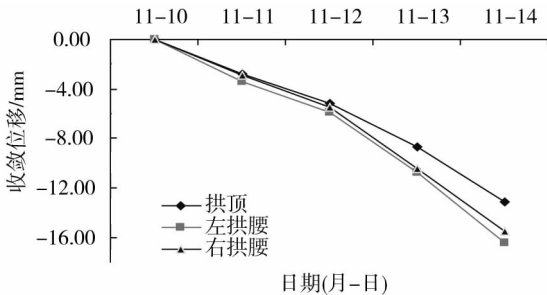


图4 ZK6+525断面周边收敛拱顶沉降-时间曲线

洞内收敛断面ZK6+525于11月10日埋设测点,11月份以来连续降雨,洞内收敛位移迅速增大,到14日,累计收敛值分别达到12.24 mm和14.54 mm,从变形曲线上看,变形速率和累计变形量已经超出了允许值.洞内观察显示,ZK6+525断面附近的左拱腰出现了环向裂缝,裂缝宽度约为10 mm;ZK6+527断面附近的右边墙(上下台阶拱架交接处)混凝土出现较大范围的开裂剥落.

2.2 塌方情况介绍

2011年11月上半月连续降雨,ZK6+526~ZK6+529段拱顶处围岩变形较明显,监测资料显示中旬拱顶沉降加大.11月14日,隧道左洞出口

管棚处出现塌方.塌方处拱顶超前小导管均断裂,两侧超前小导管部分断裂.图5是14日塌方现场.



(a)



(b)

图5 隧道塌方现场

2.3 塌方原因分析

2.3.1 偏压作用和雨水侵蚀

栎斜隧道属偏压隧道,出口段存在明显的偏压作用,自2011年11月以来连续降雨,没有及时采取有效的地表排水措施,使得洞口段岩土层富水,岩土体内孔隙水压力增大,围岩软化,抗剪强度降低,隧道出口段围岩很不稳定.

2.3.2 洞口段围岩破碎不稳定

设计资料显示洞口处第四系及全、强风化岩层厚度0.8~5.8 m,围岩极破碎,碎、裂结构,属V级围岩,隧道洞口段缺乏有效约束,强度系数逐渐减小,导致洞口段失稳,岩层最终受剪破坏.具体物理参数见表2.

2.3.3 支护不及时

原设计洞口段是先打设大管棚或环向间距300 mm的小导管,然后注浆,当夜突降暴雨,未引起足够重视,变形过大,地表沉降最大值达到36.33 mm,未及时处理,导致洞口围岩不能满足安全和质量要求,发生塌方.

3 塌方综合治理

对塌方区进行封闭注浆后提出2种处治方案,分别是长大管棚法和超前小导管注浆^[7],2种方案的对比分析见表1.

通过对塌方原因的分析,对洞口段进行刷坡处理并采用长管棚进行加固,同时在塌方段洞内监测

周边收敛位移、拱顶下沉和洞口地表沉降,浇筑 C20 混凝土,铺设防水层.

1)塌方区顶部刷坡:洞口段进行刷坡处理,为防止地表水的渗入,布置了 2 层防水层.然后施作 40 cm 厚浆砌片石,浆砌片石下铺设防水板.疏导排出残存地表水,避免地表水流入塌方区域.

表 1 隧道塌方处治方案比较

方案	优点	缺点
长管棚法	1. 一次施工掩护距离长 2. 施工周期长,施工时间短	1. 塌方区钻孔难度大 2. 成孔难,且易塌孔 3. 注浆效果难以保证,须用小导补充
超前小导管法	1. 施工灵活,钻孔及顶管难度小 2. 压浆效果好	1. 一次施工掩护距离短,施工周期短 2. 施工时间长

2)打设长管棚:在刷坡段进行长管棚加固,以增加岩土体整体的抗剪和抗弯能力、有效控制初期支护的收敛、确保施工安全.并将长管棚与明洞连接.

3)喷射混凝土:在塌方区增设钢拱架的横向连接钢筋,防止围岩应力释放不均匀,破坏初期支护.喷射混凝土加固左洞地表,防止仰坡滑裂,防止地表水渗入.

从量测断面和现场观察来看,加固后围岩变形在正常范围内,基本处于稳定状态.从 12 月 4 日后各测点累计沉降量变化都很小,基本趋于稳定.因此,喷射混凝土加固地表对控制地表变形和隧道仰坡稳定有显著效果.

4 加固效果分析

隧道塌方治理后继续进行监控量测及数值模拟分析.

4.1 加固后监控量测

图 6 是 ZK6 + 525 断面的收敛位移和拱顶下沉量与时间的关系曲线,通过量测结果可知隧道的收敛位移相对最大值为 0.26%,拱顶下沉量相对值为 0.33%,而在公路隧道施工监测技术规范中规定隧道在 V 级围岩[8]中埋深在 50 m 以下的允许相对值在 0.2% ~ 0.8% 之间,这表明加固后该断面围岩是稳定的.

4.2 加固后数值模拟分析

对斜隧道出口段现场监控量测的结果可利用有限元方法 FLAC 进行施工全过程动态模拟分析.计算模型的水平方向取 100 m,竖直方向往下

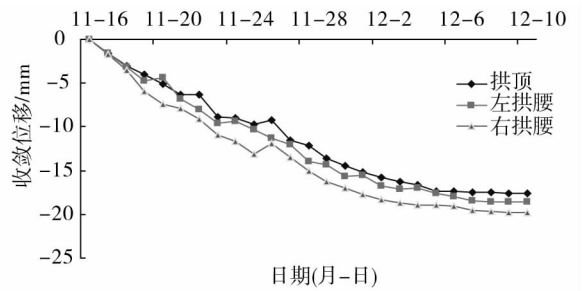


图 6 ZK6 + 525 断面周边收敛拱顶沉降 - 时间曲线

取 36 m,往上到顶部地表轮廓线.模型边界采用约束条件:底部水平和垂直方向的位移均约束,侧面仅水平方向位移约束,顶部不加约束.锚杆采用 cable 单元模拟,计算时将不同地质岩体视为均匀介质[9-10].围岩及支护结构的参数见表 2.围岩加固后的参数见表 3.

表 2 围岩及支护结构参数

材料模型	弹性模量/MPa	容重/(kN · m ⁻³)	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
凝灰岩	26.7	19.8	0.29	5.82	36
混凝土层	21.0	25.0	0.22	2.05	38
锚杆	22.0	77.0	—	—	—
钢拱架	22.0	77.0	—	—	—

应用 FLAC 软件对塌方区支护后 ZK6 + 525 断面进行数值模拟,得到应力分布和竖向位移,模拟结果见图 7 和图 8.

表 3 围岩加固后的参数

材料模型	弹性模量/MPa	容重/(kN · m ⁻³)	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
凝灰岩	28.5	20.9	0.29	6.72	38

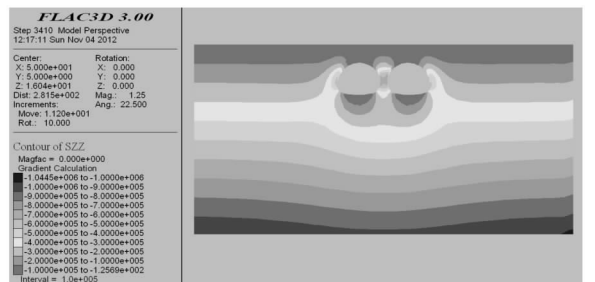


图 7 应力分布图(单位:Pa)

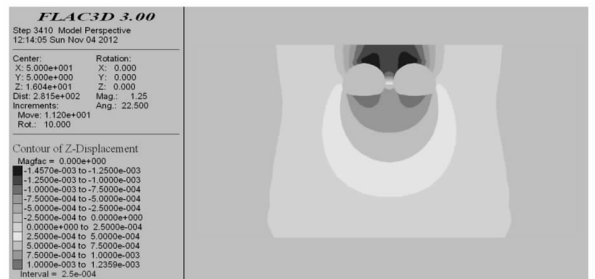


图 8 垂直方向位移分布图(单位:m)

4.3 监控量测与数值模拟分析效果比较

可以看出,经过加固处理后,围岩的数值模拟沉降量很低,与现场监控量测的结果基本一致,围岩结构处于稳定状态,变形符合规范要求.表明处塌取得了成功,可以为类似工程提供参考.

5 结论

通过上述对栎斜隧道洞口段的监控量测和数值模拟,得出了如下结论:

1)对于偏压、浅埋、围岩破碎等复杂条件的连拱隧道,在其施工过程中,要加强对进出口段的软弱围岩的地表监控量测,并对地质灾害及时预测预报,为安全施工反馈信息.

2)当隧道围岩变形较大时,要密切注意沉降变化,防止隧道塌方的连锁反应,必须快速及时地采取有效措施,来抑制软弱围岩的岩土体滑移.在栎斜连拱隧道施工中,出口段的地表变形控制较好,出现险情后及时处理,没有引起地质灾害.

3)对围岩进行刷坡处理、长管棚加固及在周边围岩喷射混凝土,可以提高围岩强度,增强围岩整体性,对治理隧道仰坡地表沉降效果显著.

洞口仰坡失稳往往是隧道失稳的累进性响应.采取诸如大管棚超前支护、台阶开挖法以缩小一次性掘进断面面积、短进尺掘进、及时施作二衬和仰拱等措施来保证施工期隧道的稳定,是保证边坡稳定的更直接、更经济的办法.

参考文献:

- [1] 姚振凯. 公路连拱隧道工程技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.
- [2] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [3] 陈秋南, 黄胜平, 周国华. 复杂条件下双连拱隧道信息化施工及应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(4): 46-49.
- [4] 汪宏, 蒋超. 浅埋偏压隧道洞口坍方数值分析与处治[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3481-3485.
- [5] 冯秀国. 采用地表注浆方法使隧道穿越坍塌区[J]. 铁道建筑, 1998(2): 28-30.
- [6] Day M J. Karstic problems in the construction of Milwaukee's Deep Tunnel[J]. Environmental Geology, 2003, 45(6): 859-863.
- [7] 陈秋南, 赵明华, 周国华. 复杂层状岩层隧道塌方原因分析与加固后信息化施工[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 650-653.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工监测技术规范(JTG XXX-2011)[S]. 2011.
- [9] 陈秋南. 非对称连拱隧道动态施工力学模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [10] 陈秋南, 张永兴, 刘新荣. 隧道塌方区加固后的施工监测与仿真分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1723-1727.