

合福铁路浅埋偏压隧道溜坍分析及整治方案研究

陈 涛

(中铁第四勘察设计集团有限公司 湖北 武汉 430063)

摘要:以合福铁路客运专线浅埋偏压隧道为例,对其溜坍事故原因进行分析,研究提出施工整治方案并对实施效果进行评价。首先,通过现场调研与有限元模拟对事故原因进行分析,结果显示,该隧道施工过程受力复杂,软弱围岩自稳性差,洞口临时支护不足及施工期发生强降雨是本次事故的主要原因。然后,结合工程实际和有限元模拟结果提出了加强支护、减少开挖步长等具体整治措施。后续施工中隧道围岩变形收敛较快,洞口稳定得到有效控制,开挖进展顺利,表明该整治方案合理可行。研究思路和方法可为同类工程施工和事故处理提供参考。

关键词:浅埋偏压隧道;溜坍;整治方案;有限元

中图分类号:U457 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2013)02-0056-05

随着我国山区高速铁路的大量修建,隧道洞口段常出现浅埋偏压情况。由于浅埋偏压隧道受力复杂的力学特点,导致其属于事故高发工程。传统的施工方法与事故处理方法研究是结合现有施工经验,针对浅埋偏压隧道的特性,提出施工整治方案^[1-4]。以合福铁路客运专线十里铺一号隧道为例,对其溜坍事故原因进行分析,并结合工程实际和有限元模拟结果提出整治方案,为同类工程施工和事故处理提供帮助。

1 工程概况与溜坍事故回顾

合肥至福州客运专线十里铺一号隧道为客运专线双线铁路隧道,位于江西省上饶市境内,设计行车速度目标值为350 km/h。双线隧道净空有效面积100 m²,隧道全长108.98 m,其中DK378+227~+260段为浅埋偏压段。隧道围岩为古界木坑组千枚岩,岩质较软,鳞片变晶结构,千枚状构造,千枚理发育,岩体较破碎,岩质较软,节理隙发育,地下水主要为基岩裂隙水,较发育,围岩级别为V级。

隧道截面为五心圆仰拱,参数为: $R_1=5.84$ m(拱顶60°), $R_2=6.04$ m(62°), $R_3=7.89$ m(17°), $R_4=13.86$ m(仰拱)。锚杆对称布置,长度为4 m,每截面均匀布置15根。其中DK378+227~+252段采用支护措施为Vc型衬砌(28 cm初支+50 cm钢筋混凝土二衬),超前预支护采用 $\Phi 108$ 洞口长管棚,管棚环向间距0.4 m;初期支护设置HW175型钢钢架,钢架间距0.6 m/榀;开挖工法采用三台阶法。DK378+252~+260段采用单压式明洞结构。出口浅埋偏压明显,DK378+250~+267段线路前进方向左侧设置4根2.25 m $\times$ 2.5 m锚固桩,桩距5 m,桩长为22 m和26 m不等。

十里铺一号隧道于2011年5月10日由进口向出口掘进,掘进至DK378+232处停止掘进。后于2011年7月19日改由出口向进口掘进。7月31日当掘进至DK378+244处时,DK378+235~+252段高山侧边坡地表出现裂缝,8月1日凌晨2点40分十里铺一号隧道DK378+235~+252段整体向低山侧溜坍,山体坍塌高度约20 m,坍塌量约1600 m³,DK378+260~+267溜坍影响段地表浅层溜坍(见图1)。塌方时隧道内DK378+227~+232段初支出现1 cm宽裂缝,后裂缝不断扩大,至2011年8月3日裂缝宽度已达到5~6 cm,拱顶下沉值达10 cm,高山侧拱腰处钢架已完全破坏。DK378+227~+235段初支受限并破坏严重(见图2)。

收稿日期:2013-01-14

作者简介:陈涛 男 1982年出生 工程师



图 1 隧道溜坍情况

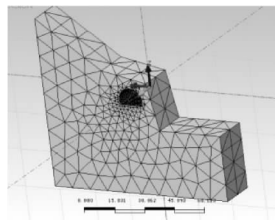


图 2 隧道初支侵限情况

2 溜坍事故原因分析

事故发生后,施工现场迅速对隧道采取抢救措施,防止二次事故发生,同时查清事故原因并研究后续施工整治方案,决定采用三维有限元模拟与现场调研相结合,对事故发生原因进行分析,并为后续整治方案提供指导。

有限元模拟采用 MIDAS-GTS 软件,对开挖施工过程进行三维模拟,并对各施工步骤中的围岩变形、支护应力和变形情况进行分析。根据隧道实际尺寸建模,并按照施工组织设计设置模拟施工步,隧道整体有限元模型和施工步骤如图 3 所示。



(a)隧道有限元模型

组名	前	I.S.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32	S33
第一次开挖#	lto30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
第二次开挖#	lto30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
第三次开挖#	lto30		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
一次喷混		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
上锚杆#			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
二次喷混#				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
三次喷混#					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
下锚杆#						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
二次衬砌#																																			

(b)隧道施工阶段

图 3 隧道整体有限元模型及施工步骤

隧道仰拱底距整体模型底部 50 m,根据圣维南原理,隧道围岩的其他部分变形不对隧道的变形产生显著影响。边界条件为:除地表外,其它平面均限制其法向位移;荷载为自重。隧道截面为五心圆仰拱。锚杆对称布置,长度为 4 m,每个截面布置 15 根。掘进步长为 1 m;每个截面的锚杆分两次施工;二次衬砌为 12 m/段。围岩参数如表 1 所示。

表 1 模型参数表

材料	模型	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 γ	弹性模量 E / GPa	内摩擦角 $C / (^\circ)$	黏聚力 φ / MPa
V 级围岩	Drucker-Prager	1 900	0.33	1.3	32	0.31
初衬	Mohr-Coulomb	2 300	0.2	22	—	—
锚杆	Mohr-Coulomb	7 700	0.3	210	—	—
二次衬砌	Mohr-Coulomb	2 500	0.27	31.5	—	—

经模拟开挖计算,得到洞口塑性区、初衬变形、锚杆应力情况和隧道围岩最大剪应变情况如图 4 所示,隧道拱顶位移和拱腰水平收敛曲线如图 5 所示。

根据图 4(a)显示,洞口围岩塑性区主要出现在洞口拱顶位置。根据锚杆内力分析结果,关键部位的锚杆轴力分布图结果如图 4(b)所示。其中,拱顶锚杆最大轴力为 78 kN,轴力最大分布在拱腰位置,为 98 kN,锚杆最大应力为 202 MPa,超过允许应力值,拱腰部位的锚杆需要加强。初期支护的 Mises 应力云图和隧道围岩最大剪应变图如图 4(c)和图 4(d)所示。从 Mises 应力云图和隧道围岩变形图可看出,隧道拱顶及其拱脚出现应力最大值,洞口段出现应力集中现象,应该更加重视这些部位的施工。从图 5 可看出,隧道洞口顶部塑性区较大,衬砌变形达 37 mm,超出规范标准。拱腰水平收敛也达到较大水平。因此,可

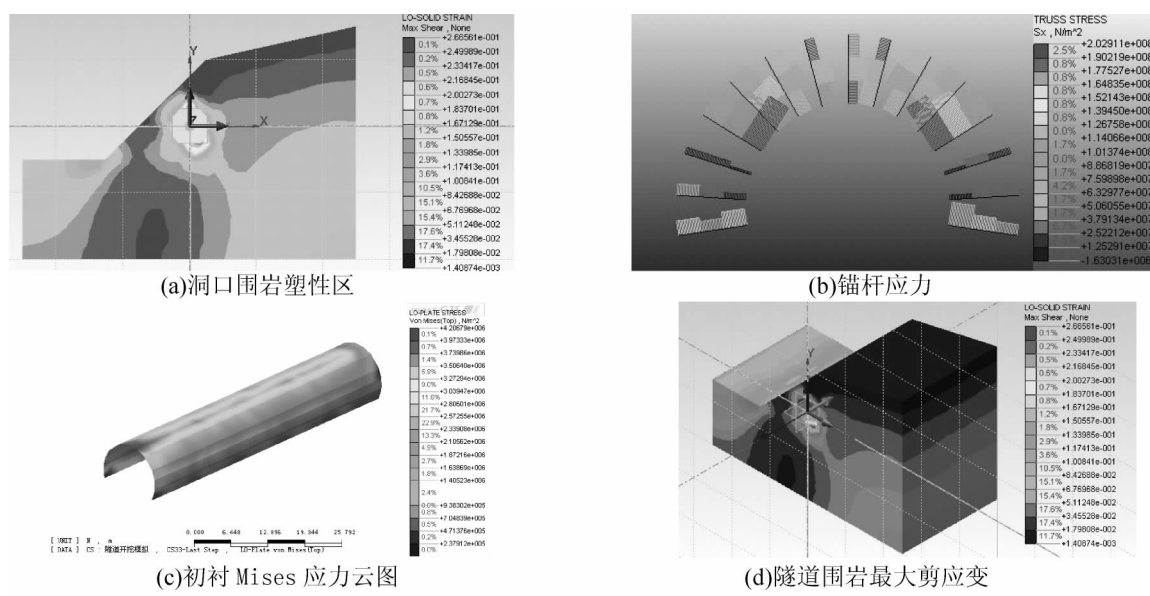


图 4 隧道有限元模拟结果图

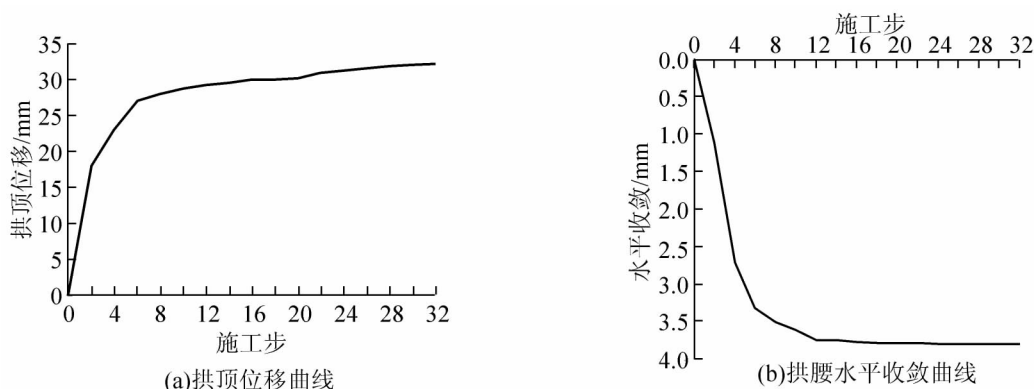


图 5 隧道洞口各部位位移曲线

判断隧道洞口段支(挡)护不足是本次事故发生的原因之一。

从围岩变形情况来看,由于隧道开挖施工破坏了隧道围岩初始应力的平衡,由于偏压存在,拱顶发生偏移,隧道拱脚斜上方岩体以及边坡脚围岩发生屈服,这是隧道地表岩体指向坡面方向发生侧滑,边坡发生溜坍的主要原因之一。

此外,出口段隧道埋深均小于 1.5 倍洞跨,属于典型浅埋隧道,出口偏压明显,当掘进至 DK378+244 处后出口山体临空。而隧道上覆地层主要为(Pt2m)古界木坑组千枚岩,岩质较软,鳞片变晶结构。由现场取样和室内试验结果看出,岩样性质接近黏土。因此,施工中坡体向山体外侧发生水平和竖向位移可能性增加。

同时,强降雨是诱发隧道发生溜坍的主要原因。洞口施工时期处于本地区降雨量较大的时期,根据气象资料显示,隧道施工地区从 2011 年 6 月 1 日至 7 月 31 日,累计降雨天数为 49 d,其中 6 月 9 日、14 日、7 月 6 日、13 日的 24 h 降雨量超过 100 mm。此时,正值隧道偏压段开挖施工,由于隧道埋深相对较浅,加之覆岩体较破碎,岩质较软,节理隙发育,裂隙发育并彼此连通,为地表降水的入渗提供了有利条件,这种地层在强降雨后软化势必导致隧道围岩的变形加剧和影响边坡稳定。

3 整治措施研究

根据有限元模拟结果,拱腰位置及拱顶部位支护,尤其洞口位置应该加强,同时既有施工步距导致围岩变形较大,因此,结合工程实际情况,提出具体整治方案如下:

(1) 为了保证人员和机械的安全,进行如下安全防范措施:①撤离洞内和地表机械,在溜坍体周围设置警戒线,严禁无关人员进出。②加强地表和洞内的监控量测,确保人员及设备安全。定期组织人员进行巡查。

(2) 清理溜坍区,将DK378+227~+260溜坍段回填至原地表,并在洞口顶部、左侧高山侧各增设一道排水沟。

(3) DK378+227~+250段左侧高山侧增设5根锚固桩防护,桩截面尺寸 $2.5\text{ m}\times 2.75\text{ m}$,桩间距5 m,桩长为28 m,采用C30钢筋混凝土现浇。

(4) 桩间临时边坡采用喷锚网防护,锚杆采用 $\Phi 22$ 砂浆锚杆,长6 m,间距 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$,梅花形布置,喷射混凝土厚度采用10 cm厚C25网喷混凝土,钢筋网采用 $\Phi 8$,网格间距 $25\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ 。

(5) 左侧高山侧边坡及进洞仰坡采用预应力锚索+C35钢筋混凝土承压板结合基材植生绿色防护。预应力锚索设计吨位300 kN,边坡锚索长16~32 m,仰坡锚索长15 m,锚固段6 m。锚索纵、横向间距3 m,与水平面呈 15° 夹角。锚索孔设计直径130 mm,孔内管注M40水泥砂浆。锚索体采用3束高强度低松弛预应力钢绞线($\Phi = 15.24\text{ mm}$)绑扎制作,钢绞线强度 $R_b = 1\ 860\text{ MPa}$ 。采用OVM15-3型锚具锁定,承压板采用C35钢筋混凝土现浇,截面尺寸为 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 。

(6) 隧道后续施工应及时进行支(挡)护,加强监控量测,以及时发现安全隐患。

4 实施效果评价

根据施工监控量测,拱顶位移和地表位移如图6所示,图中显示,处理后拱顶沉降已控制在7 mm以内,地表沉降控制在40 mm以内,经以上整治措施的综合处理,隧道变形和坡面稳定得到了极大的改善和较好的控制效果,隧道后续施工得以顺利进行,确保了工程施工安全和施工质量(如图7所示)。

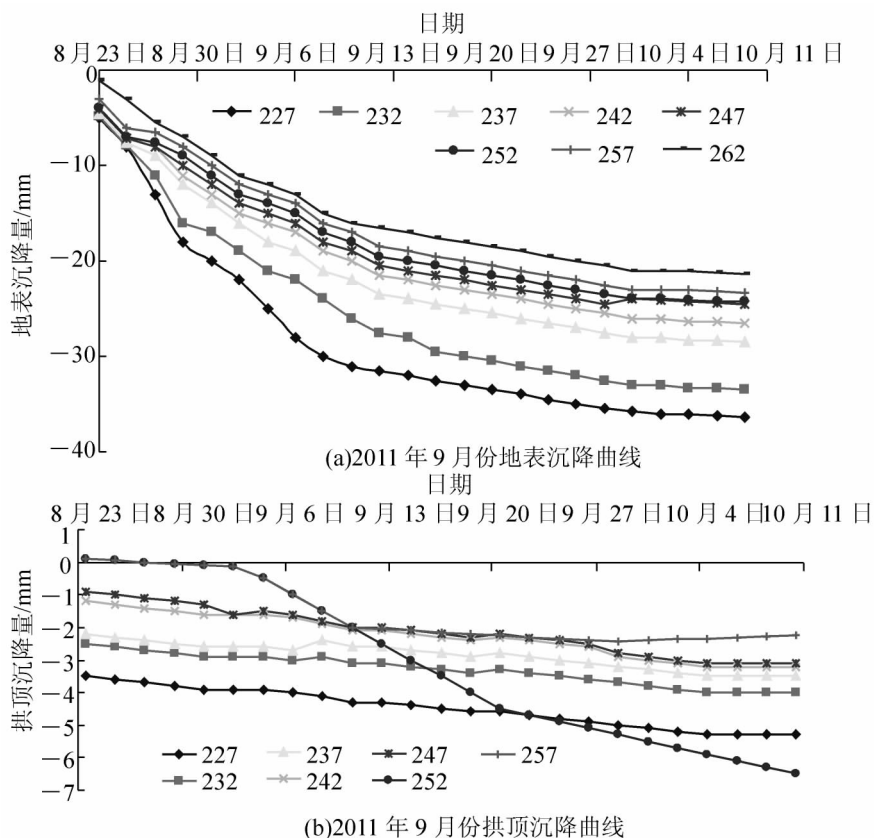


图6 拱顶位移和地表沉降曲线图

5 结论

(1) 浅埋偏压隧道变形主要发生在当前开挖段的施工阶段和下一开挖段的开挖阶段。因此,需要加强隧道开挖段的监控量测,及时发现安全隐患。应力主要集中在拱腰部位的锚杆、初期支护的拱顶、拱脚和二次支护的连接段,因此需要加强这些部位的结构强度。

(2) 在软弱破碎围岩开挖浅埋偏压隧道一直是隧道工程的难点问题,由于该型隧道受力情况复杂,围岩自稳能力差,施工中常发生溜坍、滑塌等事故。结合现场调查及有限元模拟对合福铁路浅埋偏压隧道溜坍事故原因进行分析,并提出了施工整治方案,如加强高山侧边坡及进洞仰坡支护,增加锚杆锚索长度,缩小开挖步距,增设局部抗滑桩,做好雨季施工排水防渗工作等,为同类工程施工和事故处理提供指导。



图 7 隧道后续施工情况

参 考 文 献

- [1]孙晓迈. 浅埋偏压、冲沟地质条件下公路隧道进洞方案研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2012, 25(1): 78-80, 85.
- [2]王必军. 浅埋偏压、软弱围岩双线客运专线隧道施工综合技术研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011, 24(1): 14-16.
- [3]陈建勋, 乔雄. 黄土隧道浅埋偏压洞口段套拱结构受力监测与分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 100-105.
- [4]刘小军, 张永兴. 浅埋偏压隧道洞口段合理开挖工序及受力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 3066-3073.
- [5]杨小礼, 陆志荣. 浅埋小净距偏压隧道施工顺序的数值模拟[J]. 中南大学学报, 2007, 38(4): 764-770.
- [6]周玉宏, 赵燕明, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679-683.
- [7]张敏, 黄润秋, 巨能攀. 浅埋偏压隧道出口变形机理及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 482-488.
- [8]张永利. 大跨度浅埋软弱围岩隧道施工工法比较[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2012, 25(1): 68-70.
- [9]何川, 李永林, 林刚. 联拱隧道施工全过程三维有限元分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(2): 34-38.
- [10]严涛, 金学松, 王维嘉. 老鸭岭隧道IV级围岩开挖方法三维数值分析比选[J]. 铁道建筑, 2010(8): 66-69.

Cause Analysis and Remediation Scheme of Collapse in Shallow Embedded Bias Tunnel of Hefei-Fuzhou Passenger Railway

Chen Tao

(China Railway Fourth Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The causes for the collapse of shallow embedded bias tunnel in Hefei-Fuzhou Passenger Railway are analyzed and remediation scheme are put forward and tested. The site investigation and finite element simulation analysis are employed in analyzing the causes of the collapse. The results show that the surrounding rock rising in a complex load condition, its weak stability, and rain during the construction are the main causes. Then, according to the site conditions and the results of finite element simulation analysis, a remediation scheme, including strengthening the support and reducing the excavation steps, is proposed. The construction afterwards shows that the strain of the tunnel is controlled within reasonable range, and the construction of the tunnel goes through successfully. The methods of the study may provide certain references for similar projects construction and accidents handling.

Key words: shallow embedded bias Tunnel; collapse; finite element modeling; remediation scheme

(责任编辑 车轩玉)