

德格隧道施工过程分析及冒落成因机理*

严健^{1,2},何川¹,陈四来³,姚志军⁴

(1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室,成都 610031; 2.西南交通大学 土木学院,成都 610031;
3.四川高速发展有限公司,成都 615000;4.中铁一局集团有限公司,陕西 咸阳 710054)

摘 要:为探明公路隧道过深埋破碎带施工中地层变形与受力特性,揭示围岩碎裂形成冒落破坏的成因机理,依托川藏公路新建德格隧道,对隧道施工过程进行了三维数值模拟和力学分析。研究表明:受构造破碎带和埋深影响,隧道过冲沟深埋段施工中拱顶位移均较大且会有突变,施工在竖向对围岩压应力的影响非常明显,而在水平方向对拉应力的影响更为显著,围岩竖向与水平向较大的压应力差值增加了围岩松弛区范围;深埋自重应力场较大,受施工扰动位于冲沟底部的破碎带围岩碎裂变形加剧出现冒落体,因松动地压超过支护结构承载力最终导致冒落破坏。

关键词:隧道工程;深埋破碎带;三维数值模拟;冒落;成因机理

中图分类号:O319.56 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)02-0779-07

Formatting Mechanism of Rock Falling and Analysis on Construction Process in Dege Tunnel

Yan Jian^{1,2}, He Chuan¹, Cheng Silai³, Yao Zhijun⁴

(1. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China; 3. Sichuan Expressway Construction Development Corporation, Chengdu 615000, P.R.China, 4. China Railway First Group Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi 710054, P.R.China)

Abstract: In order to explore the strata deformation and mechanical properties during the construction of the deep-buried highway tunnel with fracture surrounding rock, three-dimensional numerical simulation and mechanical analysis in the construction process of the tunnel were carried out relying on the newly built De-ge tunnel on the Sichuan-Tibet highway. Finally, the formation mechanism that the surrounding rock fractured to form the rock falling and collapse failure was revealed. The study shows that the displacement of the tunnel vaults in the deep-buried section is large and there will be abrupt changes affected by tectonic fracture and burial depth. By the effects of construction, the compressive stress in surrounding rock is very obvious in a vertical direction, and the tensile stress is more significant in a horizontal direction. The difference of compressive stress of the surrounding rock between the vertical and horizontal will expand the relaxation range of the surrounding rock. The upwelling body will come out when the cataclastic deformation of the fractured zone is aggravated due to the construction disturbance at the bottom of the gully. The formation mechanism of rock falling and collapse failure is because of the relatively large field stress in deep-buried section, besides, the loose earth pressure exceeding the bearing capacity of the supporting structure.

Keywords: tunnel engineering; deep-buried rushed zone; three-dimensional numerical simulation; rock falling; formatting mechanism

* 收稿日期:2017-12-01(修改稿)
作者简介:严健(1979-),男,四川西昌人,博士,讲师,主要从事高海拔高低温隧道工程方面的研究。
E-mail:sharefuture33@163.com
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802201,2016YFC0802210-1-1);中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2017G006-B);高铁联合基金资助项目(U1734205);国家自然科学基金(51578456)

0 引言

作为川藏经济走廊中“四路一隧”的重要工程,川藏公路北线即国道 317 线俄(尔雅塘)岗(托)段公路改扩建工程具有重要的政治、经济和军事意义。其中位于德格县的新建德格隧道,在穿越冲沟深埋破碎带时,由于多种原因引起了围岩大变形及冒落塌方、支护失效、管棚被埋等事故,对施工安全造成了极大的风险和挑战^[1]。

冒落具有高危性和突发性共存的特点,在裂隙岩体巷道中较为常见。目前针对冒落问题的研究主要集中在碎裂围岩的破坏及失稳过程、破坏模式、支护技术等方面^[2-9]。就冲沟隧道的研究,众多学者就冲沟浅埋、超浅埋隧道塌方原因进行了分析。周宗青等^[10]分析了浅埋隧道塌方地质灾害成因并提出了相应的风险控制思路。吴东鹏等^[11]的研究表明,对于浅埋偏压、超浅埋隧道,围岩力学性质差、持续降水和积水及施工支护不当是导致隧道下穿冲沟塌方的主要原因。张英才^[12]、邹福清等^[13]分别就新黄土冲沟和破碎岩层冲沟带隧道施工及坍塌处治技术进行了介绍。但针对山岭隧道在过冲沟深埋破碎带隧道时的力学分析,以及冒落成因机理的分析讨论还不多见。本文以新建德格隧道为背景,通过现场调查结合数值模拟,对隧道过冲沟深埋破碎带的施工过程进行力学分析,对冒落成因进行了探讨。研究将为正在开展的川藏高速公路和川藏铁路类似工程建设提供参考。

1 工程概况

新建德格隧道工程按二级公路单洞双向两车道设计,宽 9.0 m,高 5.0 m。德格隧道全长 2 970 m,里程桩号为 K399+375~K400+845,进口设计高程为 3 270.53 m,设计速度为 40 km/h。设计文件^[14]及施工开挖裸露岩体特性表明:隧道洞身段 K400+230~K400+280 段穿越冲沟,埋深为 180 m,冲沟沟谷位于 K400+250 位置,且于两山山谷之间。该段隧道围岩主要为中风化状三叠系上统及拉纳山组含钙绢云石英片岩、薄层绢云绿泥钙质片岩。围岩岩质较坚硬,岩体呈浅灰色,灰白色,岩体存在构造破碎带,岩体破碎呈板状,围岩级别为Ⅳ级。

根据现场对 K400+240 断面进行相应的地质编录和素描(如图 1)显示:K400+240 断面围岩中部完整性较好,深灰色绢云石英片岩;掌子面左侧

及右部围岩整体性差,岩体受地质构造影响,围岩裂隙发育,呈碎块状且破碎程度较高。

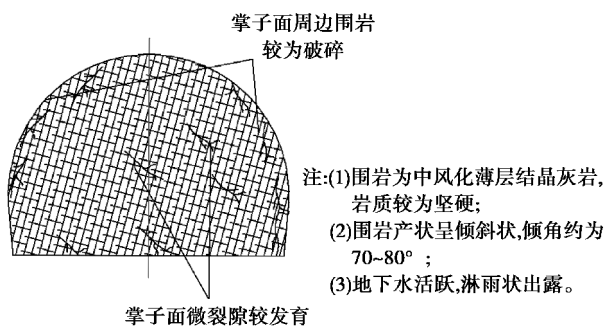


图 1 K400+240 断面地质素描图

Fig. 1 Geological sketch at K400+240 section

2015 年 5~9 月,采用上下台阶法施工,在施工期间,K400+249 断面出现了围岩大变形 2 次:第一次拱顶塌方量较少,塌方体为破碎松散岩块和土;在原塌方位置进行超前支护后,第二次塌方再次发生,塌方体为体积巨大的板状岩块,拨开掌子面拱顶处破碎板状岩块可观察到拱顶上方存在空腔(如图 2)。整个过程中不时伴有松渣、碎块石和泥水从上方中掉落,最终形成长 8 m、宽 8 m、高 5 m 的冒落腔体,冒落后拱顶部围岩自行稳定,岩石边缘锋利。



图 2 K400+249 断面掌子面前方冒落

Fig. 2 Rock falling constraints in front of K400+249

2 三维数值模拟及结果分析

2.1 洞周位移计算结果及分析

采用 ANSYS 建立隧道穿越冲沟段的三维模型,对穿越过程中围岩受力与变形情况进行研究。模拟范围为 K400+150~K400+450。考虑边界效应及对称性,最终模型尺寸为横向×竖向×纵向=35 m×(260~280 m)×300 m。模型上边界为自由边界,按实际地形建立,下边界和右边界施加法向约束,在模型左边界施加对称约束。计算模型如图 3 所示。

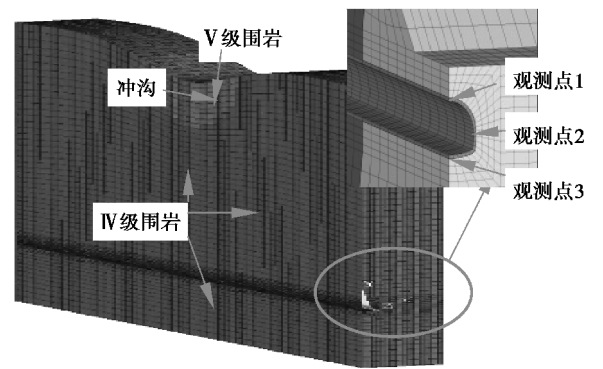


图 3 计算模型示意图

Fig. 3 Sketch of computation model

隧道围岩假定为各向同性材料,采用弹塑性本构模型,利用 Drucker-Prager 屈服准则开展非线性静力分析。围岩和衬砌结构几何参数根据设计文件取值,物理力学参数参考《公路隧道设计规范》取值。计算采用 Solid45 单元模型围岩,采用 Shell43 单元模拟初期支护,材料物理力学参数取值见表 1。

表 1 模型物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of model					
材料类型	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形 模量 E/GPa	泊松比 μ	粘聚力 c/MPa	内摩 擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
V 级围岩	18.5	1.50	0.400	0.525	45.5
IV 级围岩	21.5	3.15	0.325	0.450	33.0
初支 (C25)	23.0	29.5	0.200	—	—
二衬 (C30)	25.0	31.0	0.2	—	—

为了简化计算,计算时先使模型在自重作用下达到平衡,以得到的应力场作为初始应力场,后续计算根据施工开挖步顺序进行。计算的几个主要工序节点为:

- Step 1:初始地应力;
- Step6~7:开挖至 K400+150 断面(断面 I);
- Step 30~31:开挖至 K400+250 断面(断面 II);
- Step 56:开挖至断面 II 前方 100m,即 K400+350 断面(断面 III)。

2.2 围岩位移计算结果分析

对断面 I、断面 II、断面 III 处隧道拱顶、拱底的沉隆情况和拱腰的侧移情况进行研究。

图 4、图 5、图 6 为 3 个观测断面上拱顶、拱腰和拱底的位移动态变化情况。可以看出,3 个断面掌子面上、下台阶的依次开挖会对围岩位移变化造成波动。对于断面 I,3 个观测点的位移值在 4~5 个开挖步之后基本就已达到稳定,即掌子面后方 10 m 左右。其中,拱顶下沉隆值为 12~13 mm,拱腰侧移为 3~4 mm,拱底隆起为 5~6 mm。

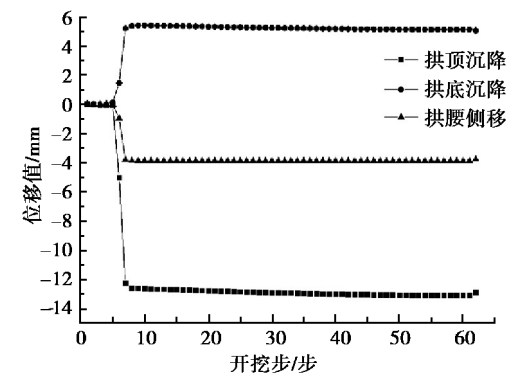


图 4 断面 I 观测点位移随开挖步的动态变化

Fig. 4 Dynamic variation of displacement of observation points for Section I

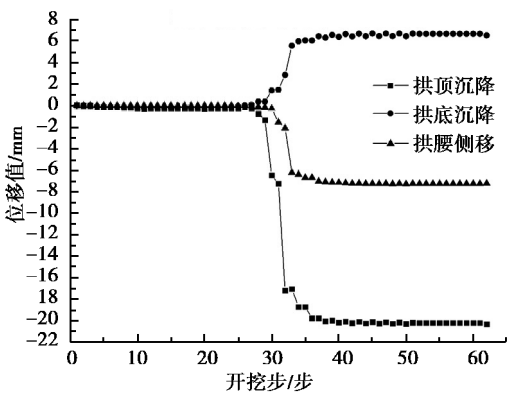


图 5 断面 II 观测点位移随开挖步的动态变化

Fig. 5 Dynamic variation of displacement of observation points for Section II

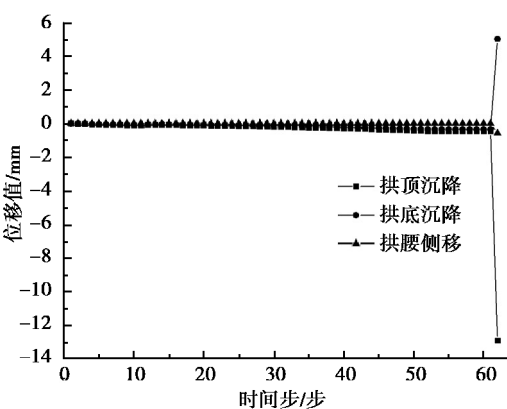


图 6 断面 III 观测点位移随开挖步的动态变化

Fig. 6 Dynamic variation of displacement of observation points for Section III

对于断面 II,在 Step 6~Step 27 之间 3 个测点的位移变化均很小,也就是说,掌子面进入冲沟段之前,施工对该断面上测点的位移值影响较小。但当隧道掌子面进入冲沟段后,开挖对断面 II 测点位移的影响逐渐增大,并且这一影响一直持续到掌子面离开冲沟段。上述过程中,断面 II 拱顶最大沉降为 21 mm,占最终位移值的 97 %, 拱底最大隆起 7 mm,占最终位移值的 96.7%; 拱腰最大侧移 8 mm,占最终位移值的 97.2%。

对于断面 III,在 Step 6~Step60 这一段内,3 个测点的位移变化很小,但当隧道开挖至断面 II 前方 100 m 处的上、下台阶时,除拱腰外,开挖对断面

III 测点位移的影响突然增大到最大值。其中,拱顶最大沉降为 13 mm,占最终位移值的 97.1%; 拱底最大隆起 5 mm,占最终位移值的 96.7%。

可见,由于这段岩体整体性较好,其最大沉降值为 21 mm,施工对洞周观测点总位移影响较小。但施工过程中,3 个断面均出现了拱顶和拱底位移观测值突然增加的现象,说明隧道过冲沟深埋破碎带时,施工中围岩将会有突然变形加剧的现象。

图 7、图 8 为关键开挖步对应的围岩位移情况。可以看出,冲沟深埋 180 m 围岩水平位移均较小,其关键步对应的围岩整体位移变化规律与上述几个观测点得到的规律基本一致。

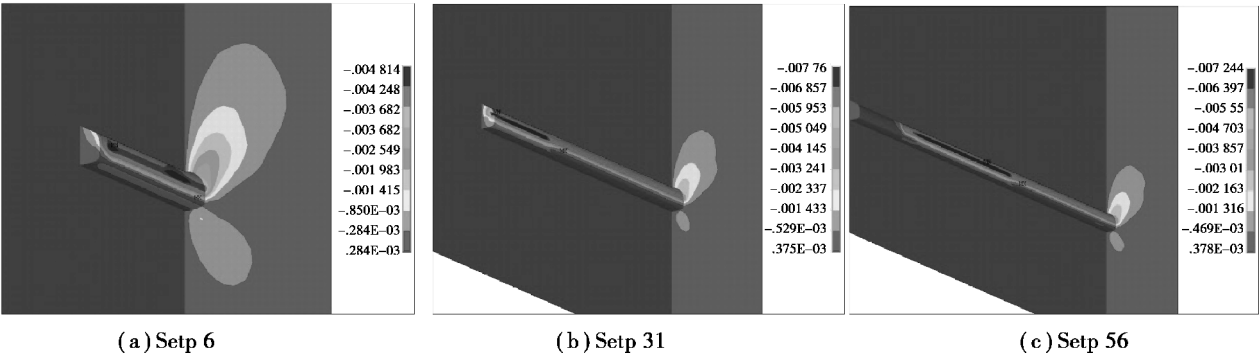


图 7 围岩水平位移云图(单位:m)

Fig. 7 Horizontal displacement contour of surrounding rock (unit: m)

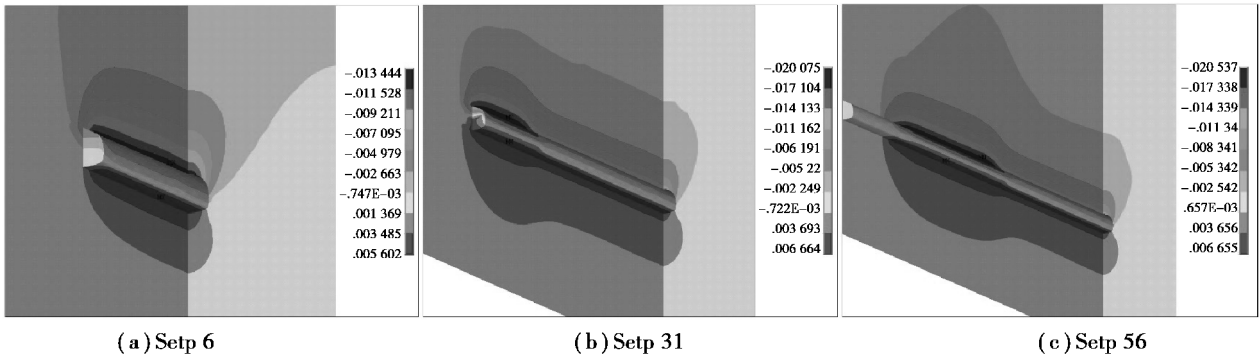


图 8 洞围岩竖直位移云图(单位:m)

Fig. 8 Verticall displacement contour of surrounding rock (unit: m)

2.3 地层应力计算结果分析

图 9 和图 10 分别为关键开挖步对应的围岩竖向应力云图和围岩水平方向应力云图(图中拉应力用正值代表,压应力用负值代表)。

从图 9 中可以看出,开挖进入冲沟深埋段时,围岩最大拉、压应力均随着开挖的进行而有所增大。当掌子面刚进入冲沟段时,围岩竖向最大拉、压应力分别为 3.26 MPa 和-5.7 MPa;当掌子面离开冲沟段时,围岩竖向最大拉、压应力分别为 3.27 MPa 和-10.1 MPa,分别增大了 0.3%和 77.2%。可

见,隧道穿越冲沟段开挖时会造成围岩应力增大,且对围岩竖向压应力的影响更加明显。

从图 10 中可以看出,当掌子面进入冲沟段时,围岩水平方向最大拉、压应力分别为 2.06 MPa 和-3.2 MPa;当掌子面离开冲沟段时,围岩水平方向最大拉、压应力分别为 4.05 MPa 和-3.26 MPa,分别增大了 96.6%和 1.8%。可见,隧道穿越冲沟段开挖时会造成围岩应力增大,且在水平方向对拉应力的影响更显著。

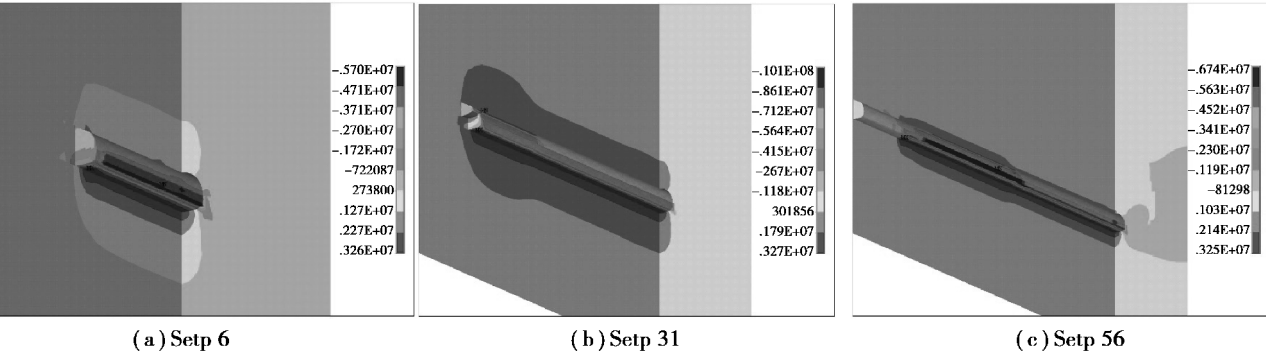


图9 围岩竖向应力云图(单位:Pa)

Fig. 9 Vertical stress contour of surrounding rock (unit: Pa)

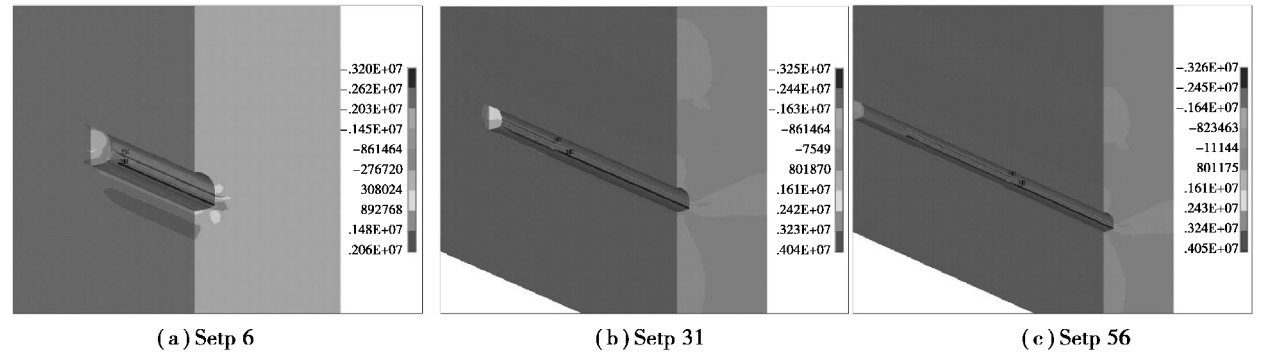


图10 围岩水平方向应力云图(单位:Pa)

Fig. 10 Horizontal stress contour of surrounding rock (unit:Pa)

相关研究成果表明:隧道发生冒落段围岩松弛区的位置和范围取决于垂直覆盖层的应力和水平应力之差^[15]。对于断面Ⅱ,掌子面进入冲沟段时,竖向与水平方向拉应力差为-0.77 MPa,压应力差为6.85 MPa。可见,围岩的竖向与水平方向压应力差值较大,且大于在冲沟底部施工时产生的水平方向压应力3.2 MPa。因此,过冲沟深埋破碎段围岩松弛区的范围较大,冒落发生的范围也将较大。

3 过冲沟深埋破碎带冒落原因机理

通过对德格隧道施工过程中围岩位移和应力的分析,结合工程现场调查、开挖出露显示和灾害特点进行归纳,总结德格隧道过冲沟深埋段破碎围岩变形冒落原因机理及有效处治措施如下:

3.1 破碎带围岩裂隙发育及自重应力场影响

德格隧道位于特殊的青藏高原板块构造部位,主要地质构造为位于八里达断层和龙悠断层之间的德格向斜。向斜总体走向310°,向斜次级褶皱发育,洞身段大角度穿越向斜轴部,易产生应力集中。现场工程地质测绘显示,隧址区主要发育两组裂隙:第一组裂面起伏粗糙,可见长度为2~4 m,

局部张开2~4 mm,无充填;第二组可见长度为2~5 m,闭合无充填,间距为1~4 m。K400+240断面围岩为深灰色绢云石英片岩和层状灰岩,围岩整体性较差,区域裂隙发育,岩体受地质构造影响呈碎块状,且破碎程度较高。

从地球动力学角度来看,封闭应力在岩石生成和构造形变的过程中产生并封存,在裂缝形成时又从围岩体中释放出来。隧道开挖后,围岩应力重分布,竖向应力因此急剧增加,在拱顶开挖临空面附近围岩发生碎裂变形,产生松动地压,形成冒落体下落并产生巨大冲击力。快速来压使支护结构上的荷载突然增加,导致上导坑初支被完全破坏,钢拱架扭曲,左上方20根φ108管棚及套拱失效、被掩埋于破碎泥水、碎石、巨形块石堆内,如图11所示。

防止围岩出现冒落体和松动地压,是维护围岩稳定的首要技术措施。为了减小围岩松动区的扩展,现场使用1:1水泥浆或水泥~水玻璃浆,注浆压力0.6 MPa,向破碎带围岩内注浆从而达到增加裂缝壁间抗力、减小围岩裂缝进一步扩展的目的。浆液充填于裂隙之中,有效地阻止了地下水的渗入,不但提高了围岩完整性、起到了改善围岩物理

力学性能的作用,更有效地控制了围岩的碎裂变形,从而防止裂隙岩体向开挖临空面的错位滑移。



图 11 隧道冒落破坏现场
Fig. 11 Photo of rock falling in tunnel

3.2 施工工法和工艺参数的影响

德格隧道过冲沟深埋段前 50 m 围岩条件好,由于工期紧迫,同时对冲沟深埋段破碎围岩的特性

认识不足,施工时采用双台阶钻爆施工,每炮装药 180 kg,施工进度可达 3~4 m/d,爆破振动大,对掌子面后面破碎围岩的裂隙扩展影响大。在进入冲沟与隧道相交处时,围岩条件变差,掌子面左右两侧围岩裂隙增加,而实际施工中没有考虑到爆破对后面破碎围岩裂隙扩展的影响。从现场施工情况来看,该工法不但没有起到较好的抑制隧道变形的效果,反而还加大了对破碎围岩的扰动。

另外,受地勘资料及对冲沟深埋段裂隙围岩隧道的认识所限,设计采用的支护形式和参数针对性不强,加之隧道开挖后围岩形成的冒落体量大、发生时间短,原设计采用的支护参数已不能满足隧道稳定性要求(见表 2)。在采取处置措施时,偏重小导管和管棚作用,特别是在处理围岩裂隙扩展和支护结构保护等关键环节上存在问题,造成隧道围岩碎裂变形和冒落破坏。

表 2 隧道支护体系参数变更前明后明细表
Table 2 List of supporting system parameters before and after the change

单位:mm
unit:mm

超前支护	初期支护				预留 变形	二次衬砌	
	喷混凝土	锚杆 纵×横	钢筋网	钢架		混凝土拱墙	混凝土仰拱
原设计	250	系统锚杆 3500@ 1000×600	φ8@ 20	I22b@ 800	150	450 钢筋混 凝土 φ20@ 25 (HPB235)	450 钢筋混 凝土 φ20@ 25 (HPB335)
变更后		中空注浆锚杆 5000 @ 1000×500 交叉斜打 WTD8000φ25 自进 式锚杆加固				600 钢筋混 凝土 φ20@ 25 (HPB235)	600 钢筋混 凝土 φ20@ 25 (HPB335)

根据其他学者研究成果,利用锚注作为控制地下工程围岩动态演化和大变形效果显著的支护手段^[16],现场在拱顶附近加大了锚注支护措施,通过改变锚杆类型和长度,采用交叉斜打的方式进行支护处理(相关参数见表 2),加固了拱顶破碎围岩的松弛区以及拉伸裂隙,取得了较好的加固效果。

4 结论

(1)德格隧道过冲沟深埋破碎带,围岩整体性差,区域裂隙发育,岩体受地质构造影响形成破碎程度较高的碎块状,开挖中受众多因素作用最终形成较大体量的冒落体,导致支护失效、管棚被埋、钢拱架扭曲的冒落事故。

(2)三维数值模拟结果和现场实际情况表明,德格隧道施工中多个观测断面的洞周位移值较小,但存在突变的可能。

(3)隧道过冲沟深埋段施工在竖向对围岩压应力的影响非常明显,在水平方向对拉应力的影响更为显著,围岩的竖向与水平方向压应力差值较大,因此冒落发生的范围较大。

(4)隧道过冲沟破碎深埋段发生冒落的主要原因是受地质构造影响围岩呈碎块状,后受施工震动影响裂隙扩展、碎裂变形体在自重应力下产生松动地压。

(5)通过施工过程力学分析和围岩冒落成因机制探讨可知,维护冲沟深埋破碎带围岩稳定的首

要技术措施是防止围岩出现冒落体和松动地压,可采用锚注支护等措施进行防治。

参考文献(References)

- [1] 褚东升, 刘志, 靳柒勤, 等. 山岭隧道穿越冲沟段施工风险分析与控制措施[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增2): 1735-1741. (Chu Dongshen, Liu Zhi, Jin Qiqin, et al. Risk analysis and control measures of mountain tunnel construction through gully section[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Supp.2): 1735-1741. (in Chinese))
- [2] Martin C D, Read R S. AECL's mine-by experiment: a test tunnel in brittle rock[A] // 2nd North American Rock Mechanics Symposium [C]. Montreal Balkema, 1996: 13-24
- [3] 缪协兴, 陈荣华, 浦海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1290-1293. (Miao Xieqing, Chen Ronghua, Pu Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1290-1293. (in Chinese))
- [4] He M C. Current condition for mechanics of soft rock in China [M]. The Korean Ins. of Min. Energy Press, 2004.
- [5] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (He Manchao, Jing Haihe, Sun Xiaoming. Soft rock engineering mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [6] 黄炳香, 刘长友, 程庆迎, 等. 基于瓦斯抽放的顶板冒落规律模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2200-2203. (Huang Bingxiang, Liu Changyou, Cheng Qingying, et al. Simulation experiment study on law of gob roof fall based on gas drainage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2200-2203. (in Chinese))
- [7] Sitharam T G, Madhavi Latha G. Simulation of excavations in jointed rock masses using a practical equivalent continuum approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 517-525.
- [8] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (Zhu Weishen, He Manchao. Mechanics for dynamic construction of rock mass and stability of surrounding rocks under complex conditions [M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [9] 刘高, 张帆宇, 李新召, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5520-5527. (Liu Gao, Zhang Fanyu, Li Xinzhaoh, et al. Research on large deformation and its mechanism of Muzhailing tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 5520-5527. (in Chinese))
- [10] 周宗青, 李术才, 李利平, 等. 浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1375-1382. (Zhou Zongqing, Li Shucai, Li Liping, et al. Causes of geological hazards and risk control of collapse in shallow tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1375-1382. (in Chinese))
- [11] 吴东鹏, 杨新安. 超浅埋隧道下穿冲沟边坡塌方分析与处治[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 24-29. (Wu Dongpeng, Yang Xin'an. Numerical analysis and treatment of collapsed shallow tunnel under gully side slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 24-29. (in Chinese))
- [12] 张英才. 函谷关隧道下穿新黄土冲沟施工技术[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(6): 70-73, 86. (Zhang Yingcai. Technology for construction of Hanguguan tunnel underpassing new loess gulch [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(6): 70-73, 86. (in Chinese))
- [13] 邹福清. 铁路双线长大隧道破碎岩层冲沟带塌方冒顶处理技术[J]. 铁道建筑技术, 2010(3): 58-60. (Zou Fuqing. Processing technology of roof fall in broken rock stratum gully collapse for Railway double line long tunnel [J]. Railway Construction Technology, 2010(3): 58-60. (in Chinese))
- [14] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 国道317线俄尔雅塘至岗托段改建公路工程德格隧道施工图设计[R]. 2011. (Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute. Construction drawing design of Dege tunnel of Eerya-Tong highway reconstruction project in National Highway 317[R]. 2011. (in Chinese))
- [15] 陈宗基. 根据流变学与地球动力学观点研究新奥法[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(2): 97-106. (Chen Zongji. Study on NATM from the viewpoint of rheology and geodynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(2): 97-106. (in Chinese))
- [16] 刘高. 高应力区结构性流变围岩稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2001. (Liu Gao. Stability study on surrounding rock with structural rheology in high stress area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2001. (in Chinese))