

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.17

某隧道初期支护变形及中空锚杆注浆效果分析

刘天毅, 孟陆波, 高美奔, 成 威, 郑建国

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 以四川某隧道为研究对象, 结合现场地质调研、空心包体地应力测试、初支与围岩接触压力监测等分析手段, 对初期支护变形破坏的原因进行分析。分析结果表明: 初支变形破坏主要是由地表水下渗、不利地应力条件、地层岩性等因素造成。同时采用 FLAC3D, 分析开挖后隧道上部粉砂质泥岩夹层对拱顶变形的影响, 以及中空锚杆注浆前后初支受力变形情况。模拟结果表明: 最大竖向位移及压应力出现在拱顶区域, 且位移随着夹层距离的增加而减小, 在 6.5 m 时出现陡降, 最大水平位移在右拱腰处; 锚杆注浆后拱顶位移减小约 10%, 边墙位移减少约 4%。本文可为类似工程变形破坏原因分析及施工处治方法选择方面提供参考。

关键词: 地应力测试; 拱架压力测试; 初支变形; FLAC3D; 中空锚杆注浆

中图分类号: TD353

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0108-07

Analysis on the deformation of initial support and hollow bolt grouting effect of surrounding rock in a tunnel

LIU Tianyi, MENG Lubo, GAO Meiben, CHENG Wei, ZHENG Jianguo

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: A tunnel in Sichuan as the research object, this paper uses field reconnaissance, geological condition analysis, the ground stress detection, wits stress surveying of the steel arch and other analysis methods, analyzing the reasons of initial support's deformation and failure. Analysis results show that initial support deformation and failure is mainly by water infiltration, adverse stress conditions, formation lithology and the larger surrounding rock pressure factors. The Flac3d simulates the influence of silty mudstone interlayer on the deformation of tunnel after excavation and the effect of hollow bolt grouting. The simulation results show that the maximum vertical displacement and compressive stress appears in the vault area, the crown displacement with the interlayer and excavation tunnel spacing increases gradually decreases, which is the biggest change in the distance to 6.5 m. The maximum horizontal displacement occurs at the right arch waist. through the analysis of deformation condition of grouting, it is found that the vertical displacement decreases about 10%, sidewall constringency is reduced by about 4%. This paper can provide reference for similar projects in failure analysis and construction treatment method.

Keywords: ground stress detection; arch pressure test; deformation of primary support; FLAC3D; hollow bolt grouting

收稿日期: 2016-07-22; 修订日期: 2016-10-26

第一作者: 刘天毅(1990-), 男, 四川广元人, 硕士, 主要从事岩石力学与岩土工程研究方面的工作。E-mail: 619967907@qq.com

0 引言

四川省某隧道是通往藏区的重要国防线和生命线,在区域路网及社会经济发展中具有重要的地位和作用。目前在隧道建设过程中,初支变形破坏现象日益突出,国内外对初支变形破坏的成因及处置措施分析已经进行了很多研究,周嘉宾,张小旺^[1]等分析了洞口段初期支护产生过大变形的原因,采用有限元软件对其开挖施工过程进行了仿真分析;李小坤^[2]从围岩的岩性条件、地下水条件、地质构造条件以及施工管理等方面,探讨滇中红层隧道产生大变形的原因和机制;张伟,刘艳青^[3]从地质和施工因素两方面对初期支护变形原因进行了分析,并对应急处理和侵限处理技术进行了介绍;窦继平,陈德健^[4]通过对隧道洞身地质条件的分析,利用有限元软件确定出控制隧道初期支护变形的支护参数;彭超^[5]针对发生的初期支护变形及沉降的主要原因,设计相应处治措施。可见,此方面已有许多研究,但大多是直接采用数值模拟反演,缺少现场的实测数据。本文通过采用实测数据分析变形原因,结合数值模拟对泥岩夹层影响及注浆效果进行研究。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

隧道设计为起讫里程为 K5 + 640 ~ K9 + 234,全长为 3 584 m,最大埋深 351 m,隧址场区整体呈河谷低山构造剥蚀地貌,线路穿越突出山脊,山前河流环绕。坡表浅沟发育,沟谷纵横,坡表在局部陡坡地段存在基岩裸露;气候属亚热带季风气候湿润类型,地层岩性主要由以粉质黏土、块石土等为主的第四系全新统(Q₄),粉砂岩、细砂岩夹薄层泥岩为主的白垩系下统夹关组(K_{1j})及粉砂质泥岩、粉砂岩为主的白垩系上统灌口组(K_{2g})组成,地下水主要以松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水为主。变形破坏区域位于背斜核部,背斜整体宽缓,呈 SN 向展布,轴部向 N 倾伏。背斜段地层主要为白垩系中厚层的粉砂岩、细砂岩夹泥岩地层。

1.2 初支变形情况

据现场实勘发现,隧道断面在 K8 + 560 附近区域出现了初期支护拱顶下沉、侵限、型钢钢架出现扭曲断裂,并伴随初支混凝土开裂、剥落掉块及局部坍塌的现象出现,据统计,拱顶初支变形破坏累计长度达 15 m。现场施做复拱后(间距 1 m),拱顶处仍出现了初支的剥落掉块现象,对施工安全造成了极大的威胁。

该区域初期支护在 12 月底出现了不同程度的纵向及环向裂缝,并且掉块区域逐步增大,裂缝主要出现在右拱腰和拱顶区域,环向裂缝最大长度约 5 m,宽度约为 2 cm,纵向裂缝最大长度约为 10 m,宽度约为 3 cm(图 1)。



图 1 初期支护变形破坏

Fig. 1 The deformation and fracture of initial support

2 变形原因分析

2.1 现场测试

为了对隧道初期支护变形破坏原因进行查明,现场采取了空心包体地应力测试、钢拱架压力测试等测试方法。

(1) 地应力测试

在右线桩号 K8 + 645 处进行地应力原位测试,测试方法为应力接触法。选择围岩完整性较好边墙面作为地应力测点,将测试深度定为 1.5 倍洞径(原岩应力区),测试结果见表 1。

(2) 接触压力测试

通过对初支变形段进行接触压力测试,分析钢拱架的受力情况,并根据压力变化趋势,对后续可能出现的问题进行一定的预测,本次在初支变形破坏区域 K8 + 559 与 K8 + 527 断面布置了监测断面,对钢拱架与围岩接触压力进行监测,结果见图 2、图 3。

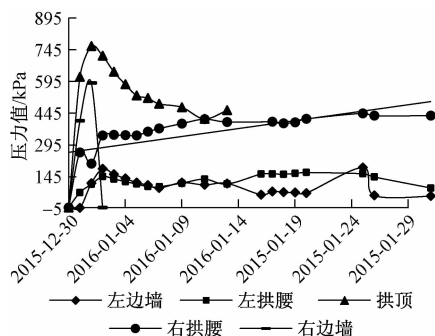


图 2 k8 + 559 断面接触压力时间-压力曲线图

Fig. 2 Time-stress curve diagram of steel arch's stress(k8 + 559)

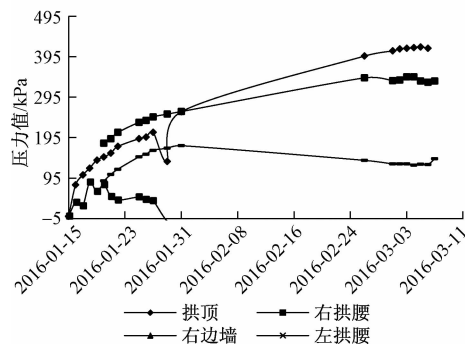


图3 k8 + 527 断面接触压力时间-压力曲线图

Fig.3 Time-stress curve diagram of steel arch's stress (k8 + 527)

从图2可以看出,钢拱架与围岩压力值前期呈现一个陡增的趋势,拱顶最大压力值达到760.7 kPa,右拱腰最大压力值达到444.5 kPa,其余位置压力值相对较小。在1月3日进行了相应的处治措施后,曲线走向由一开始的陡增逐渐变成了下降趋势,但在1月10号前后隧址区域连续下了几天大雪,各监测点位又出现了一个小幅的增长态势(右边墙与拱顶测点位置在监测期间被破坏)。从图3可以看出,钢拱架与围岩在拱顶和左拱腰的接触压力值随着时间的增长而增长,拱顶最大压力值达到了416 kPa。右边墙接触压力值随着时间增长出现了先增加后减小的变化趋势。其中左边墙测试点在喷浆时被破坏,导致数据无法采集。

表1 隧道地应力测试成果表

Table 1 Ground stress detection data of tunnel

测试桩号	测点岩性	地应力参数	最大主应力 σ_1	中间主应力 σ_2	最小主应力 σ_3
K8 + 645	砂质泥岩	量值/MPa	9.4	4.3	3.7
		方向/(°)	351	84	245
		倾角/(°)	6	21	68

说明:主应力方向是主应力的投影方向,以象限角表示;倾角为负表示俯角,为正表示仰角。

2.2 原因分析

通过现场实地踏勘和对洞内多种监测数据结果进行分析,得出初支变性破坏主要有以下原因:

(1) 工程地质条件

隧址区域降雨量充足,某些年份降水量可多达2 000 mm,地表天然分布了大量的冲沟,容易发生地表水在沟内的存积现象,同时由于隧道变形段主要是以粉砂岩为主,节理裂隙发育,地表水下渗量较大;从图6可以看出在变形破坏地段,拱顶上部分布了一条以粉砂质泥岩为主的破碎带,粉砂质泥岩属于极软-软岩,以薄层状-中厚层结构为主,工程地质性质差,且具有弱膨胀性

的,遇水易软化,失水易开裂,在干、湿交替环境下易膨胀崩解,变形破坏最严重的区域及破碎带在隧道内出露的位置,此处岩体极其破碎,强度低,容易发生掉块及坍塌现象。此段区域开挖后洞内有间歇性滴水的现象出现,同时根据现场施工情况记录及时间-压力曲线图揭示的结果,地表水的下渗量增加及地下水作用是发生初支发生变形破坏的主要原因之一。

(2) 地应力原因

通过对现场所测地应力结果进行分析得知:

① 现场所测原岩最大主应力为9.4 MPa。结合此隧道埋深(仅300 m左右),可认为地应力是处于一个相对较高水平。

② 最大主应力 σ_1 方向为351°,而隧道的轴线方向为256°,隧道轴线与最大主应力方向夹角为85°,呈大角度相交。

③ 最大主应力倾角为6°,以近水平为主,主平面都是倾斜的。

由于此变形破坏区域位于山体背斜的核部,岩层产状主要以近水平为主,而最大主应力方向同样呈近水平的方向,如此对围岩的稳定性产生了一定的不良影响,再加之最大主应力值相对较高,最大主应力方向与隧道轴线方向呈大角度相交(图4),更加剧了这种不利地质构造对隧洞围岩稳定性的影响,特别是对节理裂隙较发育的区域,极易容易发生拱顶的岩体剥落、掉块、塌方的现象,造成拱顶区域围岩的自承能力下降,对隧道的整体稳定性带来不利的影响。

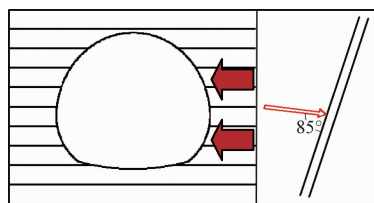


图4 地应力方向图

Fig.4 The direction diagram of ground stress

通过时间-压力曲线结果也能够看出,监测断面拱顶区域压力值较大,即支护变形破坏和拱顶掉块的直接原因是由于围岩对支护结构产生了较大的接触压力造成的。

(3) 施工原因

此段掌子面开挖采用两台阶法,由于围岩强度较低,且存在粉砂质泥岩夹层,开挖爆破后,对已经支护稳定的区域又产生了新的扰动,造成围岩内部为了寻求新的平衡而发生变形,导致初支受到破坏;同时现场仰拱

施工距离掌子面距离过长,未能使断面及早封闭成环,致使变形现象不能被有效的控制,再加上现场施工用水不当,使浸水岩体的承载能力出现了进一步降低。

3 数值模拟分析

3.1 FLAC 模型建立

本文通过建立 FLAC3D 隧道实体模型,对断面开挖后围岩的力学特征进行研究,同时采用中空锚杆注浆技术对初支变形进行处理,并分析注浆前后支护结构力学特性及变形情况。

模型采用摩尔-库伦破坏准则,水平方向(X 方向)长度约为 4 倍洞径,模型高度为 60 m,围岩与初支均采用六面体单元模拟,隧道轮廓按照图 5 设计断面同比例构建。假设岩石为各向同性、均质的材料(表 2、表 3)。将钢拱架喷砼、钢筋网与喷射混凝土视为一个共同体,中空锚杆长度选用 3 m,模拟效果由锚杆及岩体注浆两部分组成。在参数取值方面,初期支护按照弹性模量等效的原理换算到共同体上,计算公式为^[1]:

$$E = E_o + (E_g + A_g) / A_c \tag{1}$$

式中: E_o ——原混凝土弹模/GPa;

E_g ——钢拱架材料弹性模量/GPa;

A_g ——拱架横截面积/ m^2 ;

A_c ——初支喷射混凝土横截面积/ m^2 。

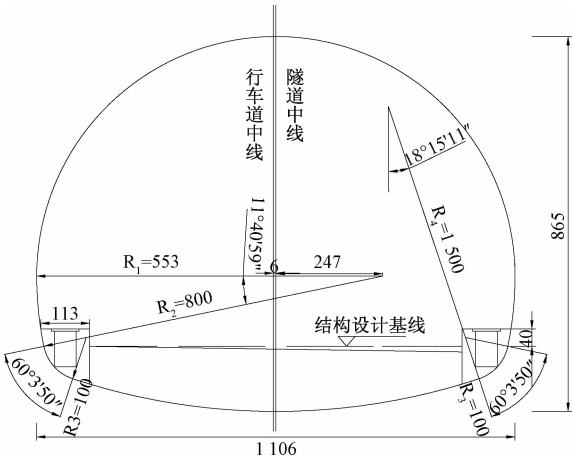


图 5 隧道断面设计图(单位:cm)

Fig. 5 The graph of tunnel section design

表 2 材料力学参数取值

Table 2 Physical and mechanical parameters of model					
材料名称	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	内聚力 C_1 /MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	容重 γ / (kN/m^3)
细砂岩	3.7	0.30	0.7	38	26.3
粉砂质泥岩	0.9	0.35	0.9	35	25.2
钢拱架喷砼	26	0.25	—	—	24.0

表 3 锚杆力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of the hollow bolt

名称	参数值	名称	参数值
锚杆弹性模/GPa	210	锚固体粘结系数/(kN/m)	2
锚杆横截面积/ m^2	0.007 85	摩擦角/ $(^\circ)$	30
周长/m	0.4	强度设计值/GPa	3.1

在岩体注浆后,内聚力的增长率较大,而摩擦系数的增加量较小。按照许宏发^[6]研究结果对注浆岩体进行强化,材料注浆前的力学参数见表 2,其中岩体参数来自现场取样后试验结果,钢拱架及锚杆力学参数取自现场施工材料检测文件;地应力测试结果显示此区域以构造应力为主,边界条件选用模型下部固定约束,其余五个方向为位移边界,按照地应力测试结果施加体应力,其中 X 方向为隧道断面水平方向,Y 方向为隧道轴线方向,Z 方向为隧道断面竖直方向。

3.2 粉砂质泥岩夹层影响分析

图 6、图 7 对开挖支护后含粉砂质泥岩夹层隧道和不含泥岩夹层隧道的变形情况进行了模拟,结果显示最大位移都出现在拱顶区域,含夹层最大位移值为 4.2 cm,与现场监控量程结果基本相符,而不含夹层最大位移值为 3.7 cm。同时含泥岩夹层拱顶发生位移区域呈现出随着与洞身竖向间距增大而逐渐变小的现象,而不含夹层的位移区随开挖进程呈现出均匀变化,说明含泥岩夹层对隧道变形破坏存在着较大的影响。

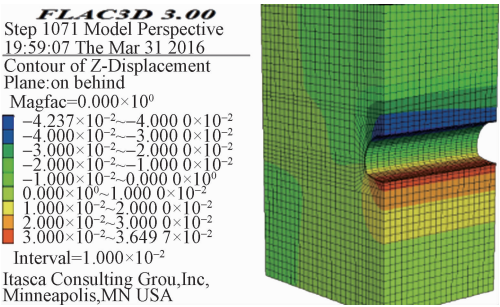


图 6 含泥岩夹层竖向位移图

Fig. 6 Vertical displacement contour with silty mudstone interlayer

在 Y 方向每 3 m 设一个测点,如图 8 所示给出了测点位移图,随着粉砂质泥岩夹层距离开挖洞身越远,拱顶位移值呈现出减小的趋势,当竖向距离达到 6.5 m 时,拱顶位移值出现了快速的减小。通过模拟结果,结合现场地质勘察资料和施工实际情况,以及保证现场的施工安全,选定中空锚杆注浆加固区域为距夹层竖向距离 7 m 以下,隧道周边 3 m 区域范围内。

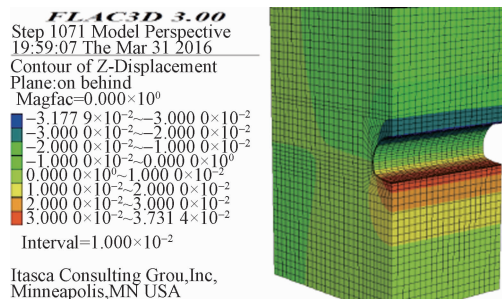


图7 不含泥岩夹层竖向位移图

Fig.7 Vertical displacement contour without silty mudstone interlayer

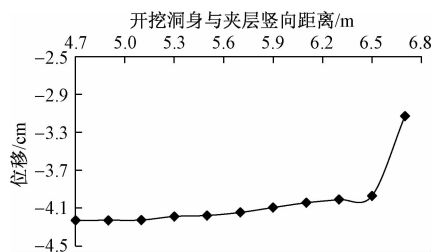


图8 拱顶位移图

Fig.8 Vertical displacement diagram

3.3 中空锚杆注浆效果分析

3.3.1 初支受力情况分析

为了对隧道初支变形破坏进行处理,保证现场施工的安全,现场拟采用中空锚杆注浆的方法作为初支变形破坏的重要处治措施之一。通过增设锚杆单元模拟中空锚杆的加固作用以及提高锚杆区域的岩体力学参数模拟注浆后的围岩力学特性,对中空锚杆注浆效果进行分析(图9)。

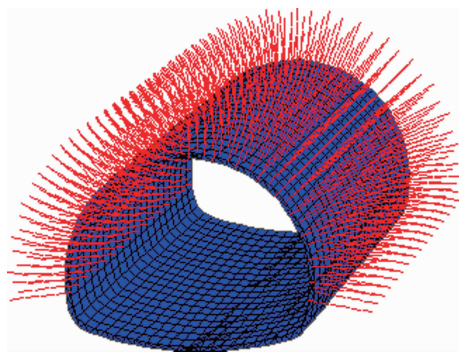


图9 中空锚杆空间位置图

Fig.9 Spatial distribution of hollow bolt

图10给出了注浆前后围岩的最大主应力分布云图,从图中可以看出最大压应力出现在拱顶和拱脚区域,说明此区域更易发生破坏,同时模拟结果显示中空锚杆注浆前后初支受力情况减小了约10%。

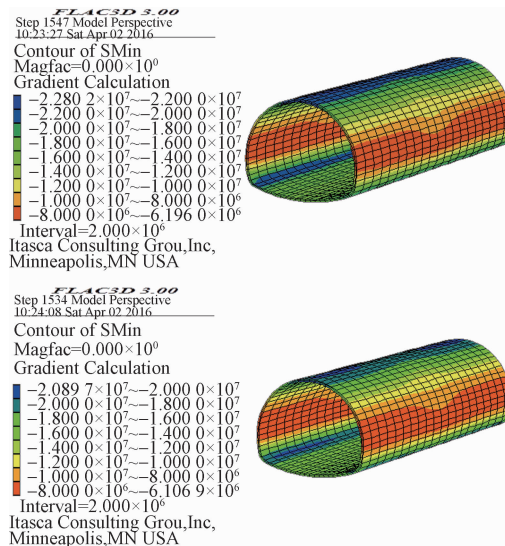


图10 初支注浆前后应力云图

Fig.10 Stress contour before and after grouting

3.3.2 初支变形情况分析

图中11~12给出了隧道注浆前后位移云图,可以看出,注浆前后Z向最大位移都出现在拱顶区域,其中注浆前最大位移值为4.23 cm,注浆后最大位移值为3.83 cm,位移减少量约为10%;水平收敛最大位移主要出现在右拱腰附近,注浆前最大位移值为1.8 cm,注浆后为1.73 cm,减小了约4%。模拟结果与现场实测结果较一致,同时也与拱架压力测试显示的拱顶与右拱腰区域压力较大的测试结果相符。

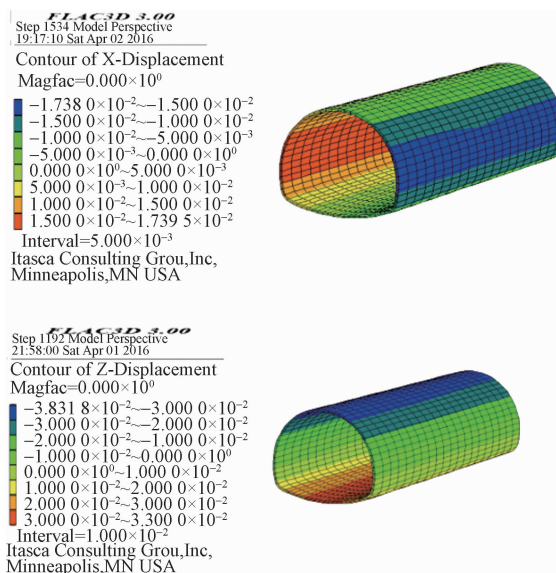


图11 注浆前初支位移云图

Fig.11 Deformation contour before grouting

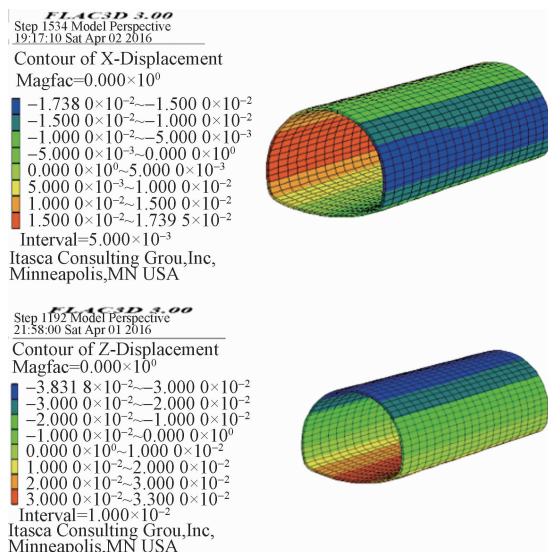


图12 注浆后初支位移云图

Fig. 12 Deformation contour after grouting

图13、图14给出了监测期间位移变化图,可以看出K8+560断面拱顶下沉及边墙收敛量在采取处治措施后位移速率开始降低,曲线开始趋于平缓,说明处治措施取得了较好的效果。

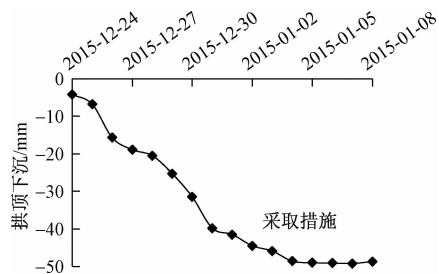


图13 拱顶下沉累积位移量图

Fig. 13 Cumulative displacement of vault settlement

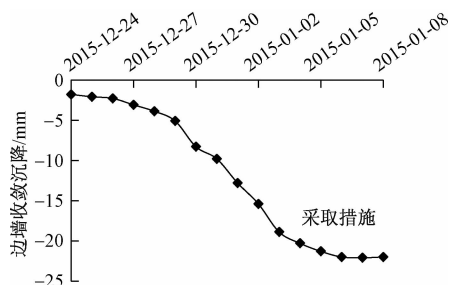


图14 边墙收敛累积位移量图

Fig. 14 Cumulative displacement of sidewall convergence

4 结论

以四川某在建隧道为研究对象,采用地应力现场测试、围岩与钢拱架接触压力测试、拱顶沉降及边墙收

敛监测等方法,分析了隧道初支变形破坏的原因,并用FLAC3D对注浆区域选择及注浆前后隧道的受力和变形情况进行分析,得到以下成果:

(1)隧道初支变形破坏是由于隧址区域地表沟壑发育,易产生积水,同时洞身主要以粉砂岩和薄层粉砂质泥岩为主,在干湿环境下易软化,强度降低;最大主应力值相对较高,最大主应力方向与隧道轴线方向呈大角度相交以及施工过程中的不当行为等原因造成的。

(2)通过FLAC3D对开挖支护后含粉砂质泥岩夹层隧道分析发现,拱顶位移区域随着竖向间距增大而逐渐变小,最大压应力出现在拱顶区域,最大水平位移出现在右拱腰区域,与现场初支变形破坏及接触压力测试结果相吻合。围岩中空锚杆注浆后拱顶区域压应力减小了约10%,拱顶沉降减少量约10%,边墙收敛减少了约4%。

(3)现场通过中空锚杆注浆等措施对初支变形破坏进行处治后,监控量测位移量逐渐趋于平缓,证明以上措施取得了良好的施工效果。本文可为类似工程在分析方法的选择及施工处治方法选择方面提供参考。

参考文献:

- [1] 周嘉宾,张小旺,侯腾飞. 浅埋偏压隧道洞口段初期支护变形分析与控制[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S1): 1411-1417.
ZHOU Jiabin, ZHANG Xiaowang, HOU Tengfei. Analysis and control of primary support deformation for the entrance of a shallow tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S1): 1411-1417.
- [2] 李小坤. 滇中红层软弱围岩隧道变形开裂原因分析及处治措施研究[J]. 施工技术, 2012, 32(1): 88-93.
LI Xiaokun. Cause and countermeasures for deformation and cracking of tunnel in weak "Dianzhong Red Strata" [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(1): 88-93.
- [3] 张伟,刘艳青. 福川隧道初期支护变形原因分析及处理[J]. 铁道建筑, 2013(5): 66-68.
ZHANG Wei, LIU Yanqing. Cause and countermeasures for initial support deformation of Fuchuan tunnel[J]. Railway Engineering, 2013(5): 66-68.
- [4] 窦继平,陈德健. 苏家湾隧道初期支护变形侵限处理措施及施工工艺的研究[J]. 现代隧道技术,

- 2014,51(6):154-159.
- DOU Jiping, CHEN Dejian. Countermeasures and construction technologies for clearance intrusion of the primary support in the Sujiawan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6):154-159.
- [5] 彭超. 公路隧道穿越浅埋断层破碎带工程处理技术[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1):134-138.
- PENG Chao. Construction techniques for a highway tunnel passing through a shallow fractured zone[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(1):134-138.
- [6] 许宏发, 耿秋生, 李朝甫, 等. 破碎岩体注浆加固体强度估计[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11):2018-2022.
- XU Hongfa, GENG Qiusheng, LI Chaofu, et al. Estimating strength of grouting reinforced bodies in broken rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11):2018-2022.
- [7] 苏仲杰, 杜淑霞, 黄厚旭, 等. 深部巷道围岩变形破坏机理数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 21(2):121-126.
- SU Zhongjie, DU Shuzhen, HUANG Houxu, et al. Numerical simulation analysis of deformation and damage of deep tunnel's surrounding rock[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2):121-126.
- [8] 翟晓荣, 吴基文. 煤层底板注浆前后采动效应数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(S1):304-309.
- ZHAI Xiaorong, WU Jiwen. numerical simulation analysis on mining effects before and after grouting of coal floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(S1):304-309.
- [9] 武科, 马明月, 李术才. 付家冲隧道监控量测与稳定性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3):543-548.
- WU Ke, MA Mingyue, LI Shucai. Monitoring measurement and evaluation of stability in fujiachong tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3):543-548.
- [10] 何磊, 杨斌, 王更峰, 等. 高地应力软岩隧道施工动态控制与优化研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(2):44-48.
- HE Lei, YANG Bin, WANG Gengfeng, et al. Research on construction dynamic control and optimization of a tunnel in soft rock under high in-situ stresses[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(2):44-48.
- [11] 朱德武. 偏压软岩隧道开挖时空效应及合理支护时机研究[硕士学位论文][D]. 重庆大学, 2011.
- ZHU Dewu. Research on the time-space effect and the reasonable supporting time of the bias soft rock tunnel during excavation [D]. Chongqing University, 2011.
- [12] 陈雪峰, 姚晨晨, 赵杰. 深埋大断面公路隧道开挖方法数值模拟分析[J]. 公路工程, 2015, 40(3):152-156.
- CHEN Xuefeng, YAO Chenchen, ZHAO Jie. Simulating analyses for excavation methods of deep buried large-section highway tunnels [J]. Highway Engineering, 2015, 40(3):152-156.
- [13] 阎海鹏, 尹万蕾, 潘一山, 等. 北京房山大安山煤矿深部地应力数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4):119-126.
- YAN Haipeng, YIN Wanlei, PAN Yishan, et al. The concentration region numerical simulation analysis and prediction research in Daanshan coal mine deep stress [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4):119-126.

敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部