

基于BP神经网络反演分析的隧道塌方机理研究

陈航, 张贝贝, 旷华江, 肖丽娜

A study of the tunnel collapse mechanism based on the BP neural network inversion analysis

CHEN Hang, ZHANG Beibei, KUANG Huajiang, and XIAO Lina

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208066>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究

Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi-source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

石鸿蕾, 郝奇琛, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 1-7

基于iTOUGH2的生物降解模型全局敏感性时变分析

Temporal variation of global sensitivity analysis for biodegradation model using iTOUGH2

杜建雯, 施小清, 徐红霞, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 35-42

使用长短期记忆神经网络进行花岗岩变形破坏阶段的判别

Determination of granite deformation and failure stages using the long short term memory neural network

陶雪杰, 徐金明, 王树成, 王亚磊 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 126-134

基于自组织神经网络的污染场地多监测指标相关性分析

Correlation analysis of multiple monitoring indicators of contaminated site based on self-organizing map

马春龙, 施小清, 许伟伟, 任静华, 王佩, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 191-202

基于FLAC3D的危岩撑-锚联合支护分配比研究

A study of the distribution ratio for combined spore-anchor supporting of unstable rocks based on FLAC3D

陈涛 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 64-64

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208066

陈航, 张贝贝, 旷华江, 等. 基于 BP 神经网络反演分析的隧道塌方机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 149-158.
CHEN Hang, ZHANG Beibei, KUANG Huajiang, *et al.* A study of the tunnel collapse mechanism based on the BP neural network inversion analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 149-158.

基于 BP 神经网络反演分析的隧道塌方机理研究

陈航¹, 张贝贝¹, 旷华江², 肖丽娜³

(1. 贵阳学院城乡规划与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550005; 2. 贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 岩溶区隧道在施工过程中易发生崩塌, 针对力学方面的隧道塌方机理分析较多, 而针对岩溶软弱破碎带等地质方面的隧道塌方机理研究分析较少。为保证隧道施工的安全性、经济性和可行性, 掌握隧道施工中的塌方机理非常有必要。依托贵州某岩溶破碎地层隧道在开挖过程中发生的坍塌现象, 结合隧道的监测数据, 运用 BP 神经网络的构建原理, 对隧道的地层参数进行反演。将反演土体力学参数输入到 FLAC3D 有限元软件构建的不同施工方法模型中, 对典型断面的崩塌破坏机制和风险进行判断和分析。结果表明: 施工方法对隧道开挖的稳定性影响较大, 针对围岩等级为 V 级的隧道, 采用三台阶七步法和单侧壁导坑法施工较安全, 隧道塌方与隧道双向同时开挖没有关系; 反演所得的隧道拱顶位移预测值为 2.3 cm, 地表位移预测值为 1.2 cm, 与监测数据偏差 13% 左右, 反演结果具有一定的可信度。研究结果对岩溶区软弱破碎地层断面隧道公路建设具有重要指导意义。

关键词: 塌方机理; BP 神经网络; FLAC3D 有限元; 参数反演; 崩塌破坏机制

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0149-10

A study of the tunnel collapse mechanism based on the BP neural network inversion analysis

CHEN Hang¹, ZHANG Beibei¹, KUANG Huajiang², XIAO Lina³

(1. School of Urban and Rural Planning and Architectural Engineering, Guiyang University, Guiyang, Guizhou 550005, China; 2. Guizhou Road and Bridge Group Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Tunnels in karst areas are prone to collapse during construction. There are many analyses on the mechanism of tunnel collapse in mechanical aspects, but the mechanism of tunnel collapse in karst weak fracture zones and other strata were seldom examined. In order to ensure the safety, economy and feasibility of tunnel construction, it is necessary to master the mechanism of collapse in the tunnel construction. Relying on a tunnel project in a karst broken stratum in Guizhou, where the collapse phenomenon occurred during the excavation process, the monitoring data of the tunnel are examined, and the construction principle of the BP neural network is used to invert the stratum parameters of the tunnel. The inversion soil mechanical parameters are input into

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2022-10-02

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608141); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字 [2022]008); 贵阳市科技局贵阳学院专项资金资助项目(GYU-KY-[2021]); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字 [2020]079)

第一作者: 陈航(1990-), 男, 硕士, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail: 330596225@qq.com

通讯作者: 张贝贝(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土、隧道等相关领域的工作。E-mail: 369226241@qq.com

different construction models constructed by using the FLAC3D finite element software, and the collapse failure mechanism and risk of typical sections are judged and analyzed. The results show that the construction method has a great influence on the stability of the tunnel excavation, and for the tunnel with the surrounding rock grade V, the three-step seven-step method and the single-side wall pilot pit method are safer for construction, and the tunnel collapse has no relationship with the simultaneous excavation of the tunnel in both directions. The predicted value of the tunnel vault displacement obtained by the inversion is 2.3 cm, and the predicted value of the surface displacement is 1.2 cm. The deviation from the monitoring data is about 13%, and the inversion result has certain reliability. The research results are of important guiding significance for the construction of tunnels and highways in weak and broken strata in karst areas.

Keywords: collapse mechanism; BP neural network; FLAC3D finite element; parameter inversion; collapse failure mechanism

近几十年,我国的经济持续快速发展,开挖隧道修建公路、铁路、水电能源的工程越来越多,面临的隧道围岩不稳定性因素及施工环境的不确定性因素增加,隧道修建规模和难度也不断增加。岩溶地区软弱地层大断面隧道的施工,存在诸如隧道塌方、沙土涌出、突泥、瓦斯爆炸等问题。隧道施工过程中,围岩一旦失稳,如果处理不好将会存在塌方风险^[1-4],带来非常严重的后果。

因此,国内外的许多研究人员针对隧道建设中软弱围岩的力学参数相关性质、变形破坏特征,围岩力学参数的快速获取方法及地质勘察手段进行了大量的分析和研究^[5-10]。赵俊杰等^[11]、文辉辉等^[12]结合实际工程,通过数值模拟和 BP 神经网络的构建原理,对隧道围岩物理力学参数进行反演,对隧道围岩稳定情况做出合理的评价和符合实际的预测;刘超等^[13]通过室内试验、微观结构成分分析、破坏形态等对隧道的粉砂质泥岩的相关力学参数进行了研究;徐明祥等^[14]通过有限元数值模拟分析了暗挖施工方法对隧道地表沉降和隧道变形规律;刘科伟^[15]借助有限元软件对不同工况下的隧道施工进行模拟与优化,总结出隧道风险评估方法各自的适用范围与局限性,但是隧道风险控制系统的编制较为简单;谢雄耀等^[16]针对浅埋弱围岩隧道的地质条件、支护设计、施工管理等方面分析了隧道塌方成因,并通过数值模拟,给出了塌方的处理措施;丁涛^[17]研究了隧道开挖过程中拱顶与地面的沉降规律;陈洁金等^[18-19]、许瑞宁等^[20]针对软弱围岩中的大断面隧道,采取数值模拟、模糊层次分析法对不同工法下隧道塌方风险进行了分析研究;高峰等^[21]通过离散元法分析了隧道塌方的特征。

针对隧道的稳定性和变形、风险评估等方面的研究取得了重要的研究成果,但针对隧道大断面岩溶软

弱破碎地区的塌方研究涉及较少。我国西南地区很多是喀斯特地貌,岩溶地区分布较广,并且由于其发育不完全,破碎带的存在更是增加工程进展的难度和风险。因此,为了采取正确有效的塌方治理方案,避免更大的安全隐患发生,使损失最小化,有必要针对隧道具体的施工情况的塌方机理和安全影响因素进行分析。

结合岩溶区软弱破碎地层大断面隧道塌方段的治理,运用 FLAC3D^[22] 数值模拟得到整体隧道的位移云图和塑性区云图,从而判断塌方机理,利用 BP 神经网络针对塌方风险因素进行地层参数反演,并对不同施工方法下的拱顶沉降位移和地表位移进行模拟,同时排除了隧道双向同时开挖对隧道塌方的影响。最终得到符合现场实际情况的地层反演参数,围岩等级的稳定性多风险因素综合评价体系。

1 工程概况

青岗山隧道位于贵州省遵义市团泽镇青岗村附近,是兰州至海口国家高速重庆至遵义段扩容工程的重点工程,隧道进口洞门采用削竹式,出口洞门采用端墙式。隧道采用上下行分离形式,设计速度 100 km/h,建筑限界(宽×高)为 14.75 m×5 m,隧道左幅长 640 m,右幅长 640 m。

青岗山隧道具体围岩级别及分布长度见表 1。其中,隧道重庆端左线桩号 ZK98+721—ZK98+738 围岩级别为 V 级,在开挖掌子面左侧围岩为中风化灰岩,右侧拱腰至拱顶处为溶蚀裂隙发育灰岩夹杂黏土填充物。

施工期间,在青岗山隧道左洞发现 ZK98+738 掌子面右侧岩体有蠕动迹象,并伴有掉块,随后掌子面黏土填充物突出至 ZK98+710 处,已施工段落 ZK98+

表 1 隧道不同级别围岩长度及占比

Table 1 Surrounding rock grade and length ratio of the tunnel

隧道名称	围岩级别	长度/m	占比/%
青岗山隧道	III	395	61.7
	IV	190	29.7
	V	55	8.6

721—ZK98+738, 上台阶拱顶初支出现坍塌, 突出物为黏土夹块石, 含水量较大, 突泥量约 2 000 m³, 见图 1(a)。ZK98 + 721—ZK98 + 738 段隧道埋深为 40.5 ~ 62.6 m, 经查看地表未出现塌陷。突泥后, 第 1 天监控 ZK98 + 721 处拱顶沉降速率为 15.5 cm/d, 第 2 天该处拱顶沉降速率为 5.4 cm/d, ZK98 + 716 处累计变形 6 mm。第 6 天 ZK98 + 720—ZK98 + 726 地表出现塌坑, 见图 1(b), 塌坑外围最大直径约 8 m, 塌坑内塌陷深度约 20 m。当持续监控至第 46 天时, ZK98 + 720—ZK98 + 726 地表再次出现塌坑, 见图 1(c), 塌坑外围最大直径约 11 m, 塌坑内塌陷深度约 10 m。



(a) 开挖掌子面突泥

(b) 地表一次塌陷



(c) 地表二次塌陷

图 1 ZK98+738 坍塌现场

Fig. 1 ZK98+738 collapse site

以该塌方案例为反演的对象, 基于 BP 神经网络进行地层参数的反演, 采用 FLAC3D 软件对岩溶区软弱破碎岩层中大断面隧道的典型断面部分进行模拟分析。

2 隧道塌方断面地层参数反演及塌方机理分析

2.1 数值计算模型

2.1.1 有限元网格模型

为了防止模型边界约束对隧道及其洞周岩土体

区域数值模拟计算产生影响, 根据圣维南原理, 假定隧道及洞周岩土体为本次模拟的重点计算区域, 设置模型边界距离计算区域的距离不小于计算区域深度的 3 ~ 5 倍, 因此建立的数值模型的长×宽×高为 140 m×20 m×100 m, 整个计算域剖分为 35 142 个六面体单元、32 468 个节点, 三维计算模型网格如图 2 所示。隧道为双洞设计, 形状为拱形, 净跨度为 14.75 m、净高 4.5 m。隧道顶部计算区域依次为粉质黏土与围岩, 覆岩层容重黏土为 1 800 kN/m、围岩为 2 700 kN/m, 隧洞支护采用 C20 喷射混凝土, 厚度为 10 cm, 挂 Φ8 钢筋网, 间距 20 cm×20 cm(纵向×环向), Φ20 水泥浆锚杆间距 120 cm×120 cm(纵向×环向)。根据本隧道的实际情况, 二次衬砌设计为主要的承载结构, 因此在隧道施工过程中二次衬砌要紧跟开挖面, 在初期支护落底后应及时施作二次衬砌仰拱和仰拱回填层, 然后施作二次衬砌。

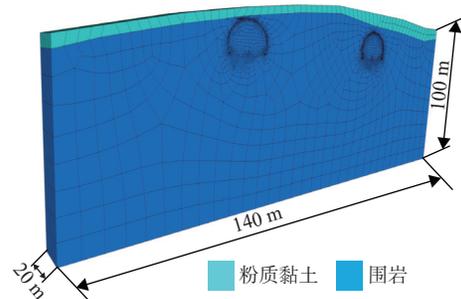


图 2 模型计算网格

Fig. 2 Computation grids of the Model

2.1.2 本构模型和边界条件

计算中采用摩尔库伦准则对土层的屈服破坏进行判断, 衬砌与仰拱采用弹性模型。模型的前后边界沿 z 方向(隧道开挖方向)水平约束, 左右边界沿 x 方向水平约束, 限制侧面节点的水平位移, 底部边界施加固定约束, 约束 y 方向以及 x 方向的位移, 模型上表面即隧道的顶部土体设置为自由边界(图 3)。

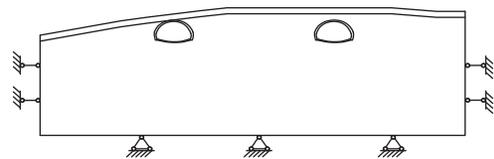


图 3 隧道边界条件示意图

Fig. 3 Boundary conditions of the tunnel

2.2 计算参数智能反演

2.2.1 BP 神经网络原理

BP 人工神经网络的原理是将设计的输入向量传

入输入层,输入层中改变其中一个参数,其他因素保持不变,然后经过神经网络的隐含层各节点,变化的参数从其取值范围内按照递增的序列排列,从而生成相应的样本,权重不断得到修正直到满足设置要求,最后到达输出层,根据模型的输出结果对网络的敏感性进行评价分析^[23]。

在岩土数值模拟分析领域的具体流程分为以下几步:

- (1)根据工程实际宏观变形特性,缩小并确定输入层参数的数目、种类与反演范围;
- (2)采用正交设计法,构造神经网络样本的输入向量(即岩土体的物理力学参数组);
- (3)将对应的输入向量输入到相应有限元软件中进行模拟计算,获得神经网络训练所需的输出向量(即相关位置的位移、应力等数据);
- (4)将输入参数与输出参数组合后,给定 BP 神经

网络隐含层设置与取值空间,使用 BP 神经网络反演程序进行样本训练,并最终得到最接近现场实际变形情况的岩土体参数组合。

2.2.2 隧道参数的正交设计

应用 BP 人工神经网络,对隧道的围岩参数进行反演研究。首先,根据隧道实际破坏情况结合模拟计算重点,确定待反演参数为岩土体的弹性模量、黏聚力与内摩擦角;之后,选取合适的正交表对隧道围岩的力学参数(弹性模量、黏聚力与内摩擦角)进行正交设计;然后根据所得正交设计参数进行数值模拟计算,得到模型中与现场监测位置对应的点的位移数据。

数值模型中共有两个地层,力学参数共计 6 个,以地勘报告中两地层力学参数为中心,采用等差设计了 6 因素 5 水平的正交试验,正交设计试验表见表 2,模型中监测点位置见图 4。

表 2 正交设计试验表
Table 2 Orthogonal test tables

编号	粉质黏土			围岩			位移	
	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	拱顶位移/mm	地表位移/mm
1	5	8.5	20	10	5	10	21	0.42
2	16.25	11.875	20	15	32.5	18.7	44	0.88
3	27.5	15.25	20	20	60	27.5	62	1.24
4	38.75	18.62	20	25	87.5	36.2	78.5	1.57
5	50	22	20	30	115	45	96	1.92
6	38.75	22	26.25	10	32.5	27.5	54.5	1.09
7	50	8.5	26.25	15	60	36.2	60.5	1.21
8	5	11.875	26.25	20	87.5	45	32.5	0.65
9	16.25	15.25	26.25	25	115	10	57.5	1.15
10	27.5	18.62	26.25	30	5	18.7	38	0.76
11	16.25	18.62	32.5	10	60	45	49.5	0.99
12	27.5	22	32.5	15	87.5	10	64.5	1.29
13	38.75	8.5	32.5	20	115	18.7	69	1.38
14	50	11.875	32.5	25	5	27.5	48.5	0.97
15	5	15.25	32.5	30	32.5	36.2	38.5	0.77
16	50	15.25	38.75	10	87.5	18.7	62	1.24
17	5	18.62	38.75	15	115	27.5	48	0.96
18	16.25	22	38.75	20	5	36.2	59	1.18
19	27.5	8.5	38.75	25	32.5	45	55.5	1.11
20	38.75	11.875	38.75	30	60	10	69	1.38
21	27.5	11.875	45	10	115	36.2	56	1.12
22	38.75	15.25	45	15	5	45	64	1.28
23	50	18.62	45	20	32.5	10	53	1.06
24	5	22	45	25	60	18.7	53.5	1.07
25	16.25	8.5	45	30	87.5	27.5	42	0.84

2.2.3 隧道参数的 BP 神经网络反演

根据数值计算所得沉降数据,通过 BP 神经网络

程序反演得到反映隧道崩塌断面处地层实际物理力学性质的计算参数见表 3,反演出的参数在实际地层

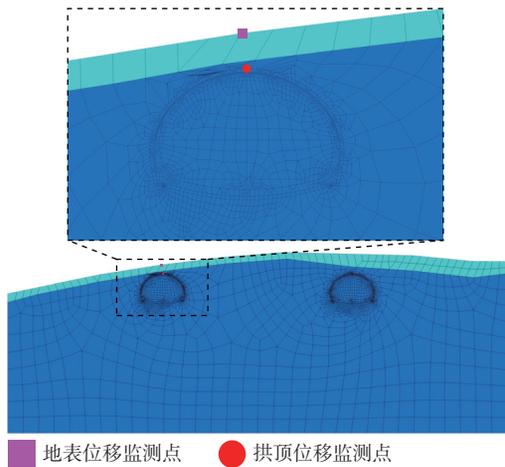


图 4 监测点位置

Fig. 4 Location of the monitoring points

表 3 地层参数反演数值

Table 3 Inversion of formation parameters

地层	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
粉质黏土	5.17	13.52	13.24
围岩	142.51	428.12	25.54

的参数范围内。

2.3 反演参数验证及隧道塌方机理分析

为了验证采用 BP 神经网络程序反演得到地层物力学参数(力学参数见表 2)的合理性, 选取实际隧道崩塌断面进行建模, 采用两台阶法进行开挖。模型计算域包含粉质黏土与围岩, 整个计算域共剖分为 165 424 个六面体单元, 包含 152 371 个节点, 崩塌大断面模型如图 5 所示。隧道开挖过程中, 岩土体开挖势必导致围岩应力沿开挖所产生的临空面进行释放, 从而完成应力场的再平衡分布。引用杨永斌等^[24]关于隧道开挖工程中应力释放率的研究成果, 假设隧道不同施工方法的应力释放率。

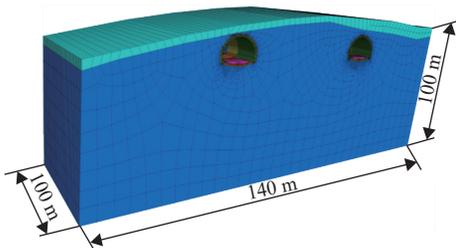
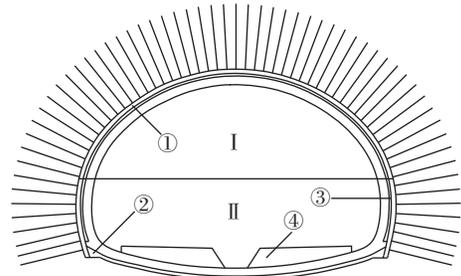


图 5 大断面隧道施工模型

Fig. 5 Large section tunnel construction model

两台阶施工方法施工工序如图 6 所示, 其具体施工顺序为: 先开挖上断面 I, 紧接着作初期支护①; 然后跳槽开挖下半断面 II, 并施作相应的初期支护②; 待初期支护趋于稳定后, 施作仰拱, 整体模筑二次衬

砌③; 最后进行仰拱回填。模型计算工况与实际施工保持一致, 每次掘进施工 10 m, 并监测记录相应监测点处的位移, 直至上端面开挖至崩塌所在断面处, 结束模拟计算。两台阶法模型及位移监测点见图 7。



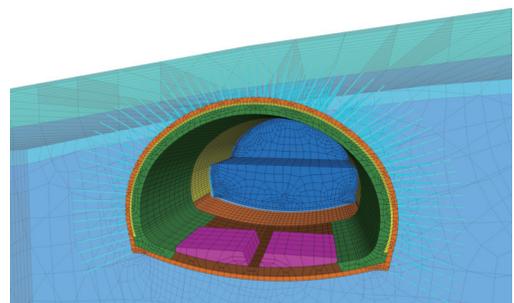
(a) 横向施工工序



(b) 纵向施工工序

图 6 两台阶施工法

Fig. 6 Two-step construction method



粉质黏土 围岩 伸缩缝 初期支护
 二次衬砌 仰拱 仰拱回填 锚杆

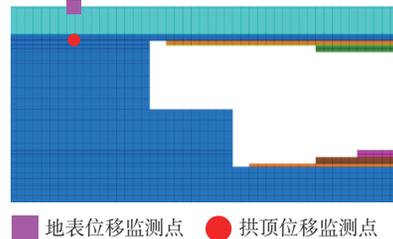


图 7 两台阶施工法和位移监测点

Fig. 7 Two-step construction method and displacement monitoring points

图 8 及图 9 分别为隧道拱顶崩塌破坏时的断面位移云图及隧道断面塑性区图。从图中可以看出, 隧道拱顶位移为 2.3 cm, 地表位移为 1.2 cm, 与监测数据偏差 13%; 隧道上台阶开挖后, 隧道上层土体由于重力

作用沿开挖临空处向下产生较大位移,并在拱顶处达到最大值(2.3 cm),该部分土体应力主要为拉应力,其塑性破坏区也呈现出连接成片的拉伸破坏分布现象;地表附近土体位移则是由于隧道拱顶位移传递导致,该部分土体并未产生明显塑性破坏;隧道下台阶土体在上台阶开挖后,发生明显隆起变形,并产生拉伸塑性破坏区。

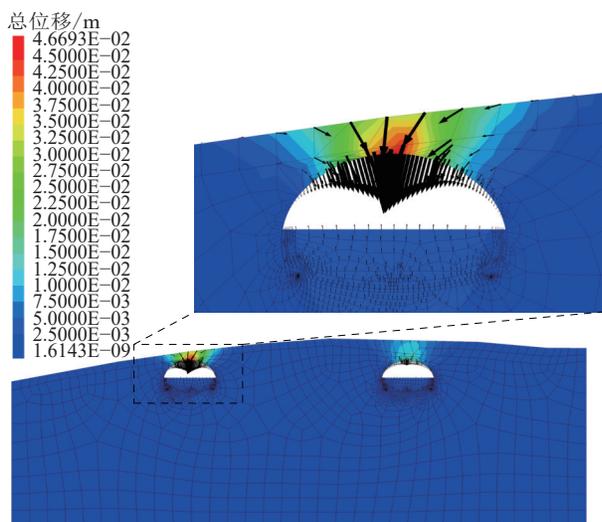


图 8 隧道断面位移图

Fig. 8 Displacement diagram of the tunnel section

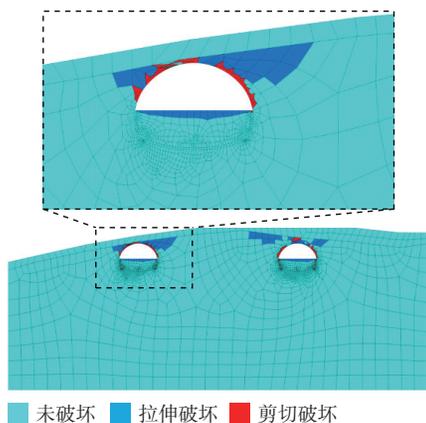


图 9 隧道断面塑性区图

Fig. 9 Plastic zone of the tunnel section

由此可见,隧道在上台阶开挖后,拱顶区域出现明显位移,产生大量塑性破坏区。该现象与现场实际观察情况基本符合,表明 BP 神经网络为基础建立的风险评价模型获得的地层参数具有一定的可信度,能够较好地再现隧道崩塌实际破坏情况,对实际施工具有指导作用。

根据模拟结果,结合青岗山隧道的具体地质情况,分析隧道围岩失稳的原因。首先,隧道里程 ZK98+

721—ZK98+738 段为不良地质体,主要为溶蚀发育泥质填充物破碎带。隧道开挖至 ZK98+724 时,掌子面围岩发生变化围岩破碎完整性较差;左拱腰至拱顶处发育一高 3 m,进深 1 m,宽 10 m 的溶腔,腔体内有泥质填充和夹块状孤石。其次,由于前期地质勘察和超前地质预报的结果有误,受其影响选择了不当的开挖方法和支护体系,针对 V 级围岩选用了两台阶施工法,该施工方法与围岩级别不符,支护强度不足是诱发隧道崩塌的主要原因。隧道掌子面开挖形成临空面,隧道内部出现沿临空面贯通的剪切破坏塑性区,丧失对其上部围岩体的承载能力,隧道顶部发生大幅度变形,软弱填充物突出形成塌方,并对已施工的部分初期支护结构造成破坏。

3 隧道安全的影响因素分析

2.3 节对反演的地层参数进行了验证,并重现了崩塌破坏的现场状况,所以认为该模型与参数具有合理性。基于该模型,进一步探讨不同施工方法(两台阶法、三台阶法、三台阶七步法以及单侧壁导坑法)以及右侧隧道开挖对左线隧道安全的影响。三台阶法先开挖断面上台阶,开挖一定距离后再同时开挖中台阶与下台阶,形成上、中、下三台阶同时并进的方法;三台阶七步法开挖以弧形导坑预留核心土为基本模式,分上、中、下三个台阶七个开挖面,各部位开挖与支护沿隧道纵向错开、平行推进;单侧壁导坑采用正台阶法开挖断面左侧先行导坑,进行先行导坑及中隔壁初期支护后再开挖断面右侧隧道洞室及施作初期支护,最后开挖断面下部施作仰拱。两台阶法模型见图 7,图 10 为三台阶法、三台阶七步法以及单侧壁导坑法模型图和对应该位移监测点。

3.1 施工方法对左线隧道安全的影响

不同施工法隧道的拱顶沉降位移和地表沉降位移随施工开挖距离的变化图见图 11。由图可知,拱顶沉降位移和地表沉降位移均随施工开挖距离的增大而逐渐增大,其中在开挖 40 m 时,两台阶开挖法的拱顶沉降位移和地表沉降位移变化加大,当开挖至 50 m 时位移突变最为显著,而实际施工采用两台阶开挖到此处时发生崩塌与实际相符,说明该开挖方法不宜采用大断面隧道岩溶地区施工中;三台阶模拟开挖至 50 m 时的拱顶沉降位移达到了 20 mm 以上,地表沉降位移达到 15 mm 以上,虽在 40 ~ 50 m 区段沉降位移变化相比两台阶法位移变化有减缓,但隧道开挖中仍存在较大的崩塌风险;三台阶七步法和单侧壁导

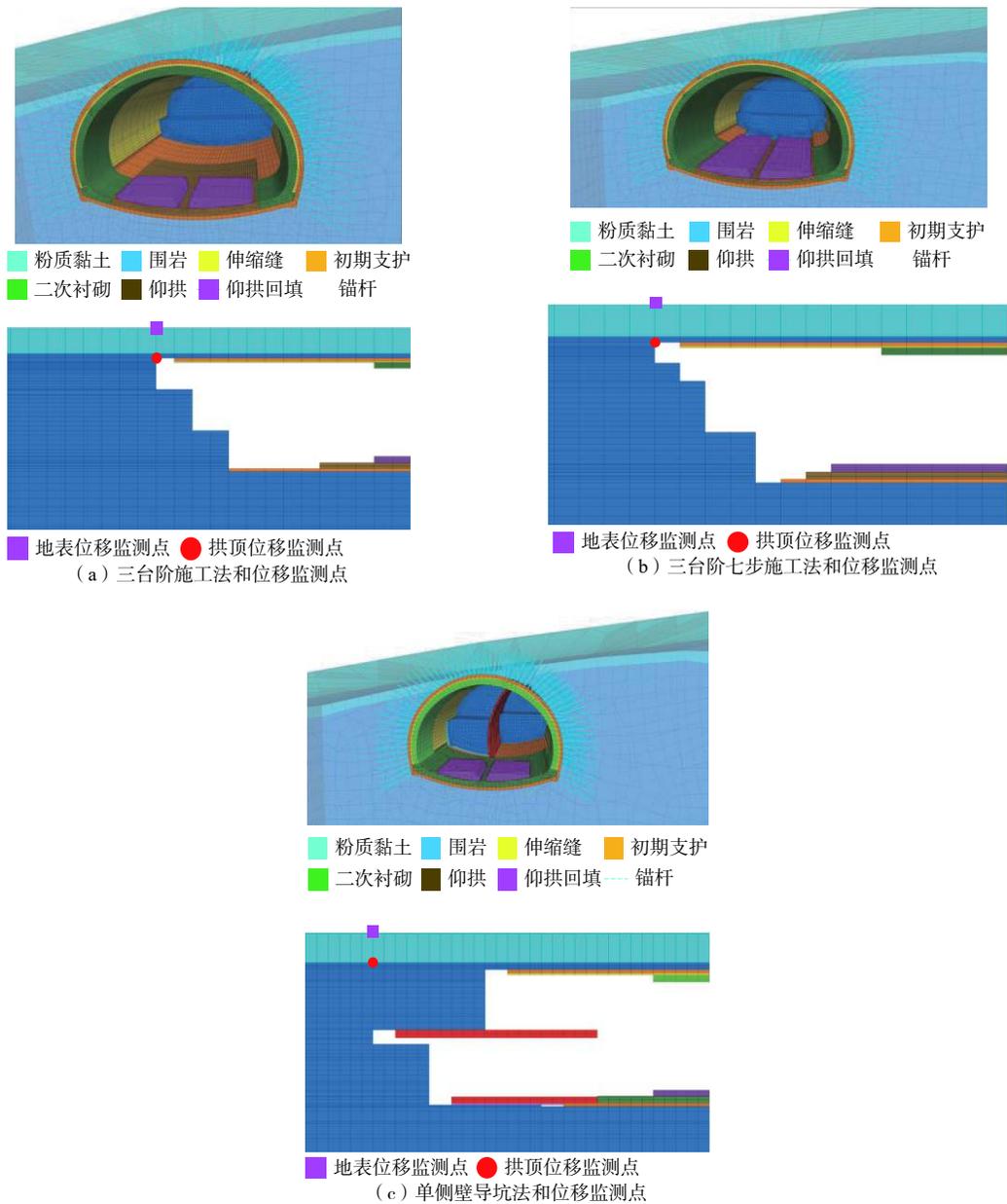


图 10 不同施工法和位移监测点

Fig. 10 Different construction methods and displacement monitoring points

坑法模拟时, 监测到在开挖至 50 m 时, 拱顶沉降位移和地表沉降位移均较小, 并且实际隧道坍塌后采用了三台阶七步法施工, 隧道坍塌得到治理, 说明三台阶七步开挖法和单侧壁导坑法均能够保证安全, 再次证明采用三维数值模拟和 BP 神经网络预测风险模型获得的反演参数具有一定可信度。

3.2 同步开挖与单线开挖影响

为研究相邻右线隧道同步开挖是否对左线隧道的崩塌产生影响, 在其他条件相同的情况下, 采用图 7 所示模型, 单独对左线隧道进行两台阶法开挖, 并将沉降监测数据与之前计算所得的双线同时开挖数据

进行对比, 如图 12 所示。发现无论是左线单线开挖还是左右双线同时开挖, 拱顶沉降位移和地表沉降位移均在开挖距离 50 m 处发生突变; 且单线开挖和双线同时开挖对拱顶沉降位移和地表沉降位移的影响较小, 模拟监测到的位移相差较小, 说明左右隧道是否同时开挖, 不是本次隧道坍塌的主要原因。

4 支护措施建议

岩溶区软弱破碎地层大断面隧道拱脚处较易发生应力集中现象, 因此对支护强度、锚固力、基底注浆时间等方面要求更高。由于支护措施对隧道的稳

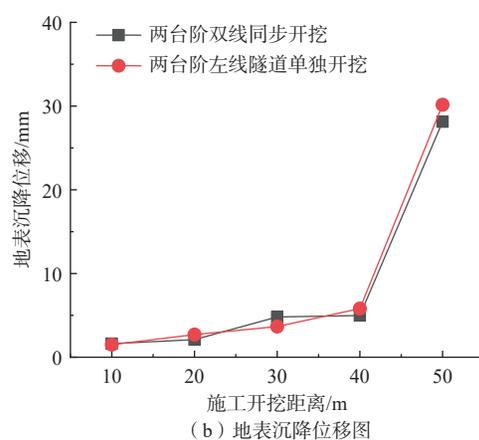
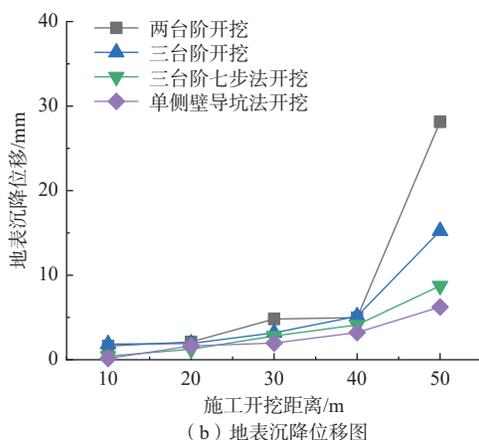
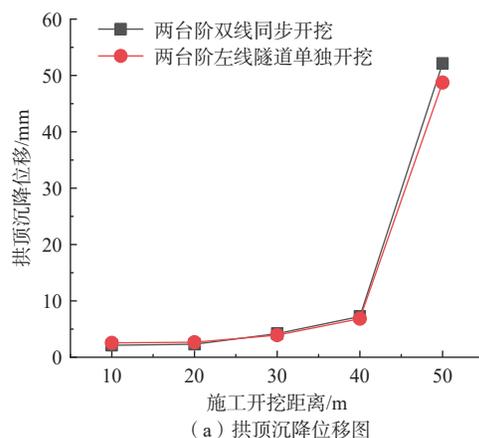
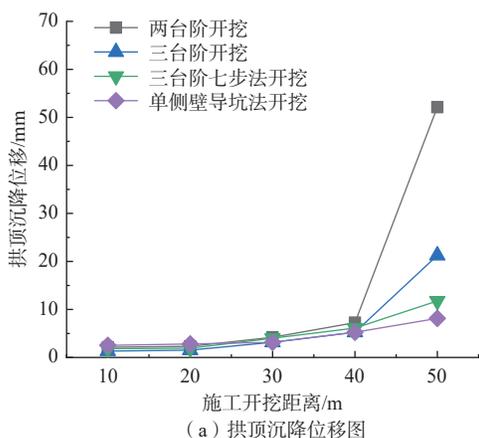


图 11 模拟不同施工方法沉降位移图

Fig. 11 Settlement displacement diagram of different construction methods

图 12 两台阶单双线开挖沉降位移图

Fig. 12 Settlement displacement map of two-step single and double line excavation

定和变形也起着关键作用,而鉴于岩土材料物理力学特性的复杂性和特殊性,为了能够及时掌握隧道施工过程中围岩的稳定程度与支护受力、变形的力学动态和信息,隧道开挖后应立即布点并进行监测,并及时对监测数据进行分析处理,在此基础上确定和调整隧道结构的支护方式及施工方法。

根据监测数据和模拟结果,针对岩溶区软弱破碎岩层中大断面隧道,围岩由Ⅲ级调整为Ⅳ级支护形式拆换施工,系统锚杆调整为注浆钢花管,二衬采用钢筋混凝土结构,并设置仰拱闭。ZK98+721—ZK98+741段处治采用Ⅴ级支护参数,核心土和下部的开挖都应在拱部初期支护保护作用下进行,模拟结果也表明缺乏正确的施工方法、围岩等级划分和支护方式是造成这次塌方的主要原因,采取正确的支护措施,对隧道围岩稳定性比较重要,否则将会影响施工过程中的经济性、安全性与可行性。由FLAC3D数值模拟和BP神经网络得到可靠的地层反演参数,根据地层反演参数模拟再现崩塌现象,结果表明三台阶七

步法或者单侧壁导坑法,针对该隧道类型和围岩等级具有较好的防治效果。

5 结论

(1)采用BP神经网络方法对地层围岩参数进行了反演分析和验证,反演所得的隧道拱顶、地表位移预测值与监测数据偏差13%左右,误差较小,可知由该方法反演得到的地层参数能较好地反映实际隧道崩塌破坏情况。

(2)基于FLAC3D有限元建立的模型分析,施工方法的选取对崩塌事故影响较大,崩塌隧道拱顶处应力主要以拉应力为主,其塑性破坏区呈现出连接成片的拉伸破坏塑性区;地表附近土体位移则因隧道拱顶位移传递导致,该部分土体并未产生明显塑性破坏;隧道下台阶土体在上台阶开挖后,发生明显隆起变形,并产生挤压剪切破坏区。

(3)通过不同施工方法的地表、拱顶位移沉降进行分析,针对本文研究的围岩等级为Ⅴ级的隧道,三

台阶七步法或者单侧壁导坑法开挖较合适;左、右隧道同时开挖对隧道崩塌几乎没有影响。

参考文献 (References) :

- [1] QIAN Qihu. New development of rock engineering and technology in China[C]. Proceedings of 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Harmonising Rock Engineering and the Environment. Beijing: Taylor and Francis Group, 2011: 57 – 61.
- [2] HUDSON J A. The next 50 years of the ISRM and anticipated future progress in rock mechanics[C]. Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Harmonising Rock Engineering and the Environment. Beijing: Taylor and Francis Group, 2011: 47–51.
- [3] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090 – 1113. [LI Shucan, LIU Bin, SUN Huafeng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090 – 1113. (in Chinese with English abstract)]
- [4] XIA Kaizong, CHEN Congxin, ZHENG Yun, et al. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 129 – 147.
- [5] HAN Lei, ZUO Yanyan, GUO Zeng, et al. Mechanical properties and deformation and failure characteristics of surrounding rocks of tunnels excavated in soft rocks[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35(6): 2789 – 2801.
- [6] WANG Q, PAN R, JIANG B, et al. Study on failure mechanism of roadway with soft rock in deep coal mine and confined concrete support system[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 81: 155 – 177.
- [7] HUANG Xing, LIU Quansheng, LIU Bin, et al. Experimental study on the dilatancy and fracturing behavior of soft rock under unloading conditions[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 15(6): 921 – 948.
- [8] ZHANG Zhiqiang, SHI Xiaoquan, WANG Bo, et al. Stability of NATM tunnel faces in soft surrounding rocks[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 96: 90 – 102.
- [9] 戴永浩, 陈卫忠, 田洪铭, 等. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 4149 – 4156. [DAI Yonghao, CHEN Weizhong, TIAN Hongming, et al. Study of large deformation and support measures of Daliang Tunnel with soft surrounding rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 2): 4149 – 4156. (in Chinese with English abstract)]
- [10] XIA Kaizong, CHEN Congxin, WANG Tianlong, et al. Estimating the geological strength index and disturbance factor in the Hoek-Brown criterion using the acoustic wave velocity in the rock mass[J]. *Engineering Geology*, 2022, 306: 106745.
- [11] 赵俊杰, 贾斌, 张东, 等. 基于 BP 神经网络的阿拉套山隧道围岩物理力学参数反演分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊1): 220 – 226. [ZHAO Junjie, JIA Bin, ZHANG Dong, et al. Inverse analysis of physical and mechanical parameters of Alataoshan tunnel surrounding rock based on BP neural network[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(Sup 1): 220 – 226.]
- [12] 文辉辉, 尹健民, 秦志光, 等. BP神经网络在隧道围岩力学参数反演中的应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(2): 47 – 51. [WEN Huihui, YIN Jianmin, QIN Zhiguang, et al. Application of BP neural network to the back analysis of mechanical parameters of tunnel surrounding rock[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(2): 47 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘超, 袁伟, 路军富, 等. 某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 108 – 115. [LIU Chao, YUAN Wei, LU Junfu, et al. A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 108 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 徐明祥, 黄强兵, 王庆兵, 等. 西安地裂缝地段浅埋暗挖地铁隧道施工沉降规律[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 161 – 170. [XU Mingxiang, HUANG Qiangbing, WANG Qingbing, et al. Settlement rules of shallow-buried metro tunnel construction in the Xi'an ground fissure section[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 161 – 170. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘科伟. 公路隧道建造期塌方风险分析及控制的系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012. [LIU Kewei. The systemic landslide risk analysis and control in the construction of highway tunnels[D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese with English abstract)]

- [16] 谢雄耀,蔡杰龙,周应新,等. 浅埋软弱围岩隧道施工塌方及处治措施研究[J]. *建筑施工*, 2022, 44(3): 545 – 549. [XIE Xiongyao, CAI Jielong, ZHOU Yingxin, et al. Research on collapse and treatment measures for shallowly buried weak surrounding rock construction[J]. *Building Construction*, 2022, 44(3): 545 – 549. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 丁涛. 浅埋隧道下穿高层建筑稳定性及相互影响研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013. [DING Tao. Study on the stability and interplay for shallow-buried tunnel under-traversing the high-rise buildings[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈洁金,周峰,阳军生,等. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2365 – 2370. [CHEN Jiejn, ZHOU Feng, YANG Junsheng, et al. Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2365 – 2370. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈洁金,高超,晋婉晴,等. 软弱地层大断面隧道三台阶七步法与临时仰拱法适应性分析的对比研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(增刊1): 180-186. [CHEN Jiejn, GAO Chao, JIN Wanqing, et al. Comparative study on adaptability analysis of three benching seven steps and temporary invert method for large-section tunnel in soft stratum[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(Sup 1): 180-186. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 许瑞宁,王志杰. 昔格达组地层大断面隧道施工工法比选分析[J]. *公路*, 2017, 62(1): 231 – 236. [XU Ruining, WANG Zhijie. Comparative analysis on construction methods of large section tunnels in xigeda formation strata[J]. *Highway*, 2017, 62(1): 231 – 236. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 高峰,唐星,李星,等. 基于UDEC离散元法的隧道塌方特征分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(1): 24 – 28. [GAO Feng, TANG Xing, LI Xing, et al. Tunnel collapse characteristics based on UDEC discrete element method[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2018, 37(1): 24 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陈育民,徐鼎平. *FLAC/FLAC3D基础与工程实例*[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [CHEN Yumin, XU Dingping. *FLAC/FLAC3D foundation and engineering example*[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese)]
- [23] 向欣. 边坡落石运动特性及碰撞冲击作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010. [XIANG Xin. Research on motion characteristics and impact force of rockfall[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 杨友彬,郑俊杰,赖汉江,等. 一种改进的隧道开挖应力释放率确定方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2251 – 2257. [YANG Youbin, ZHENG Junjie, LAI Hanjiang, et al. A revised method for calculating stress release ratio in tunnel excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2251 – 2257. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农