

基于 Fluent 软件小型非连通型溶洞注浆数值模拟 及裂隙数量影响^{*}

余希明¹ 陈俊生^{2,3} 刘星宇² 刘叔灼^{2,3}

(1. 广州地铁建设管理有限公司, 510610, 广州; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 510610, 广州; 3. 华南岩土工程研究院, 510610, 广州)

摘 要 [目的] 溶洞的注浆处理是地铁隧道工程中的难点, 施工时溶洞的不恰当处理极易引发事故, 因此有必要对小型溶洞裂隙数量和注浆压强之间的关系进行研究。[方法] 针对需注浆填充的城市小型非连通型溶洞(体积不大于 8 m^3) 的裂隙数量不确定问题, 采用 Fluent 数值模拟软件中的多相流 Mixture 模型进行不同裂隙数量的溶洞注浆数值模拟, 计算模拟注浆时, 测试区的注浆压强随时间的变化情况, 并与实际工程溶洞注浆压强数据进行对比分析。[结果及结论] 对于体积不大于 8 m^3 的小型非连通型溶洞, 其模拟注浆时测试区的注浆压强与裂隙数量呈平方反比关系, 注浆压强随着裂隙数量的增加而降低; 当裂隙面积达到 0.048 m^2 时, 注浆压强不再降低; 注浆压强随着裂隙位置的增高而降低。在实际工程中, 可通过对比同类型体积不超过 8 m^3 小型非连通溶洞之间的注浆压强数据, 判断溶洞的相对裂隙数量, 调整与优化后续的注浆方案。

关键词 地铁; 小型非连通型溶洞; 裂隙数量; 注浆压强
中图分类号 U445.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.048

Numerical Simulation of Small Unconnected Karst Caves Grouting and Crack Quantity Impact Based on Fluent Software

YU Ximing¹, CHEN Junsheng^{2,3}, LIU Xingyu², LIU Shuzhuo^{2,3}

(1. Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., 510610, Guangzhou, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, 510610, Guangzhou, China; 3. South China Institute of Geotechnical Engineering, 510610, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] Grouting treatment of karst caves is a challenge in metro tunnel engineering, as improper handling of karst caves during construction can easily lead to accidents. Therefore, it is necessary to study the relationship between the quantity of cracks and grouting pressure in small karst caves.

[Method] To address the uncertainty regarding the quantity of cracks in urban small unconnected karst caves (with a volume not exceeding 8 m^3) that requires grouting filling, numerical simulations of cave grouting with different crack quantities are conducted using multiphase flow Mixture model in Fluent numerical simulation software. The variation of grouting pressure in the test area during simulated grouting is calculated over time and compared with karst caves grouting pressure data from practical engineering. [Result & Conclusion] For small unconnected karst caves with a volume not exceeding 8 m^3 , the grouting pressure in the simulated test area shows an inverse square relationship with the quantity of cracks, and decreasing as the crack quantity increases. When the crack area reaches 0.048 m^2 , the grouting pressure no longer decreases. The grouting pressure decreases with the increase in the elevation of crack locations. In practical engineering, comparing grouting pressure data among the same type of small unconnected karst caves with volumes not exceeding 8 m^3 can serve as a basis for judging the relative quantity of cracks in karst caves, thereby adjusting and optimizing subsequent grouting schemes.

Key words metro; small unconnected karst cave; crack quantity; grouting pressure

0 引言

岩溶地貌是一种常见的地质现象, 广泛分布于世界各地, 我国许多大城市如武汉、南宁、广州、深圳等地下都有复杂的岩溶区。随着我国地铁建设的高速发展, 越来越多的地铁盾构隧道在建设时会不可避免地通过岩溶区, 虽然这些城市岩溶区的溶洞多为小型溶洞, 但依然严重威胁着地铁隧道的施工安全。若不处理岩溶区而让地铁隧道直接通过或岩溶处理不当, 容易对盾构隧道造成岩溶周围塌

^{*} 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515010713)

孔、浆液流失、涌水、盾构掘进卡钻及地面构筑物塌陷等问题,成为影响工程质量、威胁施工安全、延迟施工工期的工程难题^[1]。岩溶区的地铁隧道建设是事故频发区,处理城市岩溶段是城市地铁隧道施工中的重要课题。

注浆充填是较为常见的小型溶洞和城市地铁隧道岩溶区处理技术^[2-3]。已有文献大多集中于分析溶洞的位置、形状和大小,以及注浆材料、注浆技术、空溶洞对隧道开挖的影响^[4],对溶洞内部裂隙数量的研究较为缺乏,裂隙数量的不确定性易造成注浆效果不佳。同时,在进行注浆量计算时,多采用理论公式法和经验公式法,存在较大的误差,这就导致了注浆过程中容易出现注浆材料消耗过多,注浆效果不理想和注浆成本过大等问题^[5]。

本文采用 Fluent 数值模拟软件,通过注浆模拟探究小型溶洞裂隙数量和注浆压强之间的关系。Fluent 软件作为最常用的计算流体力学模型软件之一,具有操作简便、界面友好等特点,在计算流体力学领域和实际工程中均具有极强的应用价值^[6]。本文针对非连通型溶洞裂隙数量的不确定问题,采取数值模拟注浆过程和实际工程注浆相结合的研究方式,提出用注浆压强判断小型溶洞相对裂隙数量的方法。本文研究可为溶洞注浆优化方案提供一定的指导与借鉴。

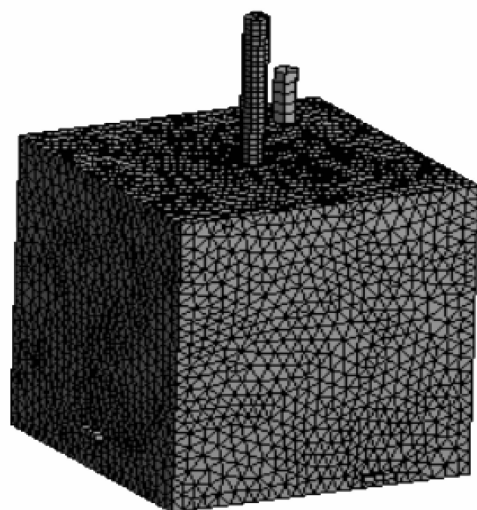
1 计算模型与方法

1.1 溶洞模型

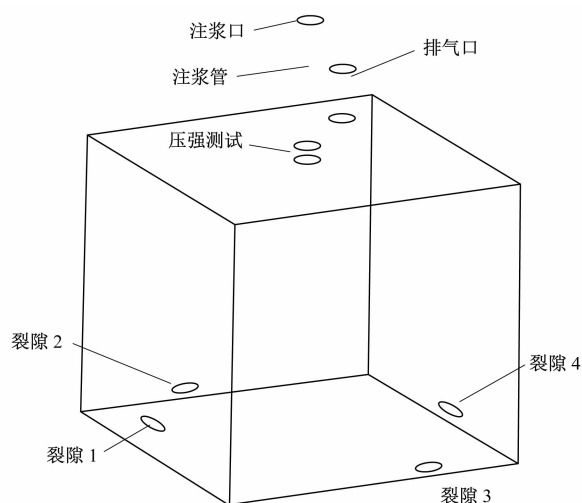
首先,建立立方体溶洞模型,溶洞体积为 8 m^3 ,溶洞模型上方有 1 个注浆口和 1 个排气口,注浆口是长为 1 m 的圆柱体,排气口是长为 0.35 m 的圆柱体,注浆口和排气口的直径均为 0.15 m 。溶洞裂隙出口为长方体,尺寸为 0.20 m (长) $\times 0.04 \text{ m}$ (宽) $\times 0.05 \text{ m}$ (高)。分别建立不同裂隙数量 ($n=0,1,\dots,N$) 的溶洞模型进行模拟分析,溶洞模型网格数量级为 10^5 个,溶洞模型及其网格模型示意图如图 1 所示。

1.2 数值计算方程

溶洞注浆排出空气的过程不考虑溶洞内流体的相变与界面状态,相对于 VOF(流体体积)模型,多相流 Mixture 模型的迭代计算更稳定,不容易出现回流,故采用多相流 Mixture 模型进行空气和泥浆气液两相流计算。多相流 Mixture 模型的连续性方程及动量守恒方程参考文献^[7]。



a) 网格模型



b) 溶洞模型

图 1 溶洞模型及其网格模型示意图

Fig. 1 Diagram of karst cave model and its mesh model

1.3 前处理设定

1.3.1 流场模型

Mixture 两相流模型的主相为空气,次相为泥浆。注浆材料选择水泥砂浆,泥浆动力黏度 μ 取为 $4.51 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,密度 ρ 取为 $1.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,水灰质量比为 1^[8]。

雷诺数 Re 可以表示为:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

式中:

v ——流体流速;

d ——特征长度。

由式(1)可以求得水泥浆的雷诺数远远小于 20 000,故流场模型为层流模型。

1.3.2 边界条件与模拟方法

边界条件入口采用速度入口,注浆速度恒定为 0.1 m/s (即 1.65 L/s);边界条件出口均采用自由出流条件。压力测试区设定为:取注浆管末端 $1/10$ 处,测试区长为 10 cm ,测试该处的总压强。

由于本文的流场模型为层流模型,故采用 SIMPLEC 算法进行注浆模拟。SIMPLEC 算法是一种压强-速度关联算法,具有计算速度快等优点。分别对无裂隙溶洞(仅有1个人工排气出口)、2个裂隙溶洞、4个裂隙溶洞、6个裂隙溶洞、8个裂隙溶洞工况进行注浆模拟,对2个裂隙溶洞和4个裂隙溶洞工况各进行一次裂隙置于溶洞上部和裂隙置于溶洞下部情况的模拟,其余各数量的裂隙溶洞只进行

裂隙置于溶洞下部的模拟,共进行了7种工况的模拟。所有模拟均采用瞬态方法,时间步长为 0.05 s ,时间步长次数为 $15\,000$ 次,单个步长迭代次数为 10 次,总模拟时间为 750 s 。

2 计算结果与分析

2.1 Fluent 软件压强模拟结果

将无裂隙溶洞工况设定为封闭式溶洞工况,2~4个裂隙溶洞设定为少裂隙溶洞工况,6~8个裂隙溶洞定为多裂隙溶洞工况。以4个裂隙溶洞为例,不同注浆时间 t 下溶洞浆液体积分数变化的 Fluent 软件截图如图2所示。

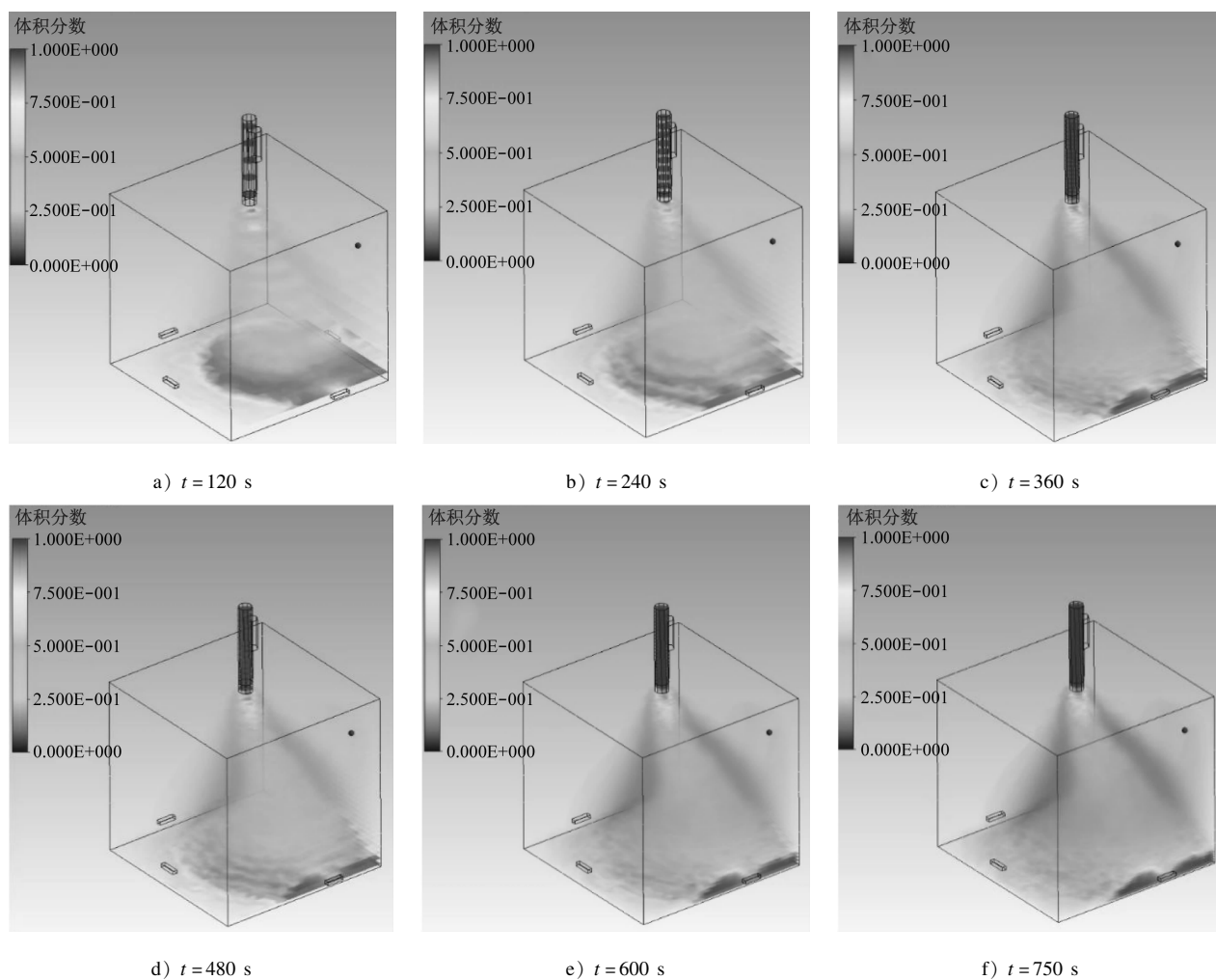


图2 不同注浆时间下溶洞浆液体积分数变化的 Fluent 软件截图

Fig.2 Screenshot of karst cave grout volume fraction changing over different grouting durations in Fluent software

采用 ANSYS 软件对7种裂隙溶洞数量工况进行分析,不同裂隙溶洞数量工况下,注浆压强随注浆时间的变化情况如图3所示。

筛选图3中的注浆压强数据,每 50 s 取值一次,去除压强奇异点后,可以得到不同裂隙溶洞数量工况下,注浆压强随注浆时间变化的对比,如图4

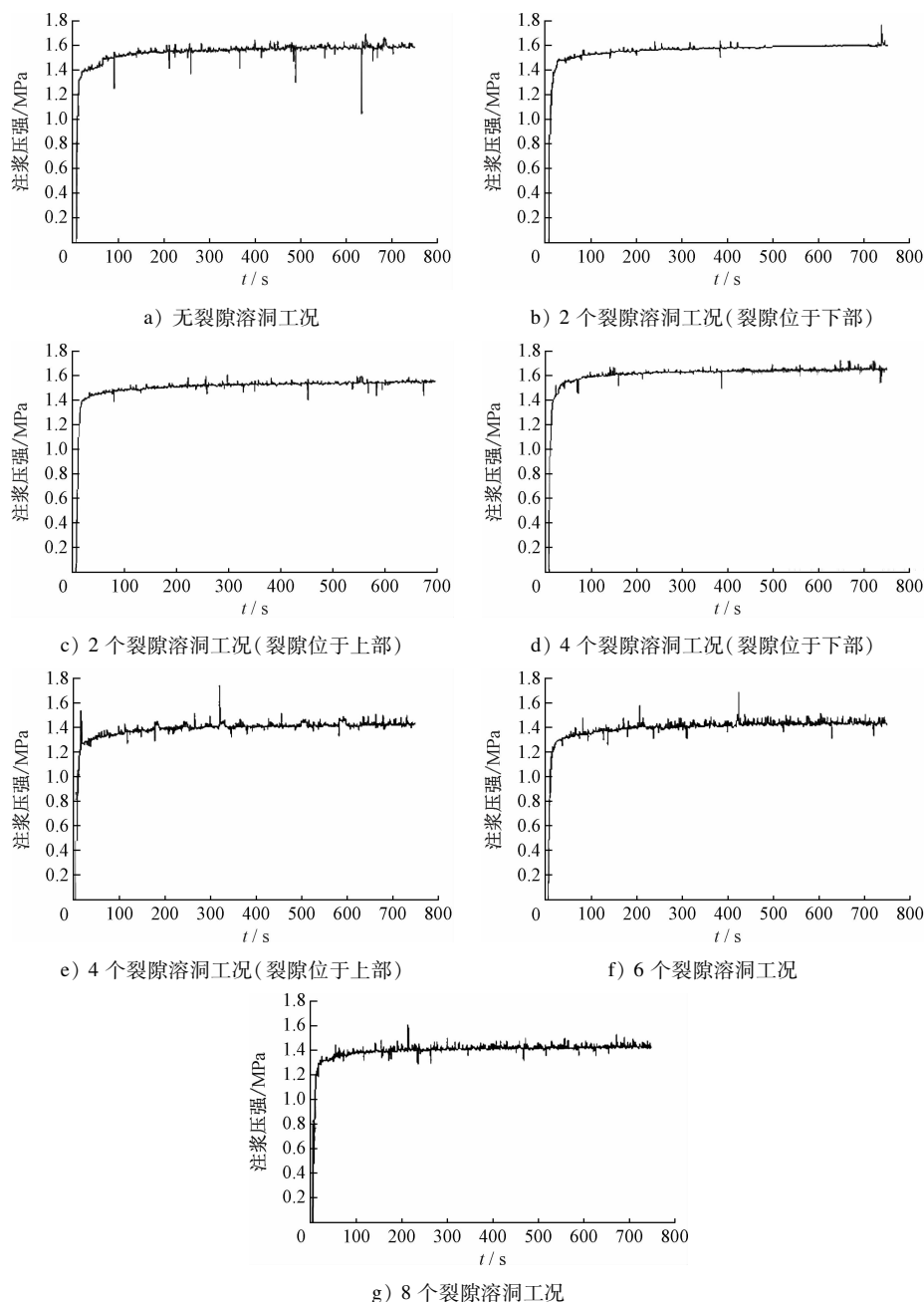


图3 不同裂隙溶洞数量工况下注浆压强随注浆时间的变化情况

Fig. 3 Situation of grouting pressure changing with grouting duration under different cave crack quantity working conditions

所示。由于图3中6个裂隙溶洞工况的注浆压强和8个裂隙溶洞工况的注浆压强基本一致,且曲线存在重合之处,因此图4不再绘制8个裂隙溶洞工况曲线。注浆平均压强随裂隙溶洞数量的变化情况如图5所示。

当注浆时间为50 s时,Fluent软件的注浆压强数据才迭代稳定,此时注浆压强达到了约1.4 MPa,并在接下来的400 s内缓慢上升1~2 MPa,在450 s

时注浆压强达到峰值;在之后的300 s内,注浆压强在峰值附近波动,所有模拟工况的注浆压强在Fluent计算稳定后均位于1.3~1.6 MPa范围,不同模拟工况的压强差值并不大。

溶洞裂隙数量越多,整体注浆平均压强越小,且两者接近平方反比关系。6个裂隙溶洞工况时,注浆平均压强便不再变化。无裂隙溶洞工况和2个裂隙溶洞工况因Fluent迭代未稳定而导致两者的注

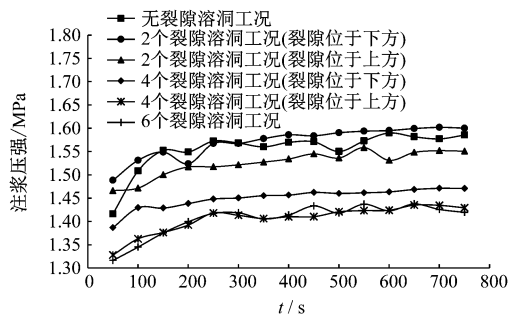


图4 不同裂隙溶洞数量工况下注浆压强随注浆时间变化的对比

Fig.4 Comparison diagram of grouting pressure changing with grouting time under different cave crack quantity working conditions

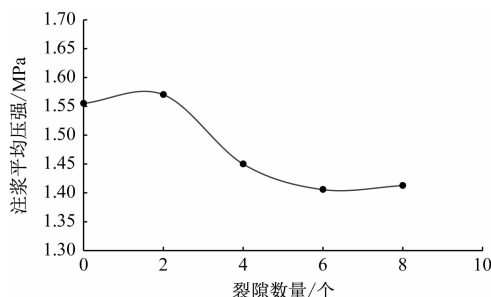


图5 注浆平均压强随裂隙溶洞数量的变化情况

Fig.5 Situation of average grouting pressure changing with cave crack quantities

浆压强相似。2个裂隙溶洞工况—6个裂隙溶洞工况下,其注浆平均压强均随着裂隙数量的增加而减小,其中:2个裂隙溶洞工况—4个裂隙溶洞工况的注浆平均压强降幅约为0.10 MPa;4个裂隙溶洞工况—6个裂隙溶洞工况的注浆平均压强降幅为0.04 MPa;6个裂隙溶洞工况—8个裂隙溶洞工况的注浆平均压强则几乎无变化。由此可知,6个裂隙溶洞工况下的注浆平均压强已经降到最小值。

2.2 实际工程案例溶洞注浆压强分析

广州地铁12号线工程槎头车辆段需进行溶洞注浆,收集其中6组前25 min的注浆压强测试数据(工程注浆1—工程注浆6),6组数据的注浆速度均为1.25 L/s。不同工程注浆工况下,数值计算模型所得注浆压强随注浆时间的变化情况如图6所示。由于该实际工程注浆速度较Fluent软件模拟注浆速度稍低,故整体注浆压强模拟值偏低。除工程注浆4外,单个注浆压强曲线的变化不大,变化幅绝对值不大于0.1 MPa,这与Fluent软件模拟稳定后压强变化不大的结果相一致。此外,实测压强曲线组梯

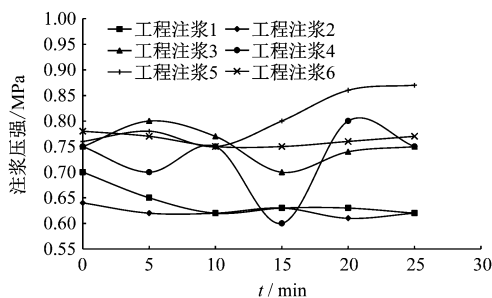


图6 不同工程注浆工况下注浆压强随注浆时间的变化情况

Fig.6 Situation of grouting pressure changing with grouting duration under different engineering grouting working conditions

度分明,大致可分为3个梯度,这与Fluent软件模拟结果相似,也可按照整体曲线压强大小由高到低对应封闭式溶洞工况,少裂隙溶洞工况和多裂隙溶洞工况。

对少裂隙溶洞工况,可采取适当加入混凝土速凝剂和增大浆液注入量的措施;对于多裂隙溶洞工况,需放弃注浆,采取其他溶洞处理方式。根据注浆压强判断小型溶洞裂隙数量的方法亦有局限性,例如对于工程注浆4曲线,其压强上下波动,无法判断裂隙数量,可采取继续注浆,同时收集压强数据,待压强稳定后再判断或采用其他方法进行处理。

3 结论

1) 对于体积不大于 8 m^3 的小型非连通型溶洞,其注浆压强与溶洞裂隙数量有关;控制注浆速度不变,注浆压强与裂隙数量呈平方反比关系,注浆压强随裂隙数量的增加而降低;当裂隙面积达到 0.048 m^2 时,注浆压强便不再降低;裂隙位置越高,注浆压强越小。

2) 对于实际工程的溶洞注浆,当探明溶洞体积为不大于 8 m^3 的非连通型溶洞时,在进行注浆填充的同时需保持注浆速度不变。收集同一地段的多个溶洞注浆压强数据,将此作为参照组,再在同一地区不同溶洞进行注浆操作时,可将新得到的溶洞前期注浆压强数值与参照组进行对比,判断溶洞的相对裂隙数量,作为后续注浆方案调整的参考依据。

参考文献

- [1] 刘恒. 深圳地铁14号线隧道岩溶处理技术方案对比及优化[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(12): 142.

(下转第296页)

工程中的实际问题,还为对称曲线道岔设计等其他类型的道岔设计提供了借鉴。

2) 该道岔具有结构简单、维护方便、造价低等特点,满足跨座式旅游观光单轨系统的功能要求和景观要求。

3) 单回转替换梁型曲线道岔可满足道岔布置时的特殊需求,不仅适用于既有线路的改建、扩建或过渡工程,还适用于项目用地紧张的新建线路。

4) 通过有限元分析,对道岔主要构件的刚度、强度、结构疲劳进行计算,所设计的道岔在各方面均满足设计要求。

5) 单回转替换梁型曲线道岔的基本型式不仅适用于跨座式旅游观光单轨系统,也适用于跨座式单轨和悬挂式单轨等其他制式线路。

参考文献

- [1] 王金. 跨座式单轨道岔技术参数分析[J]. 铁道建筑技术, 2020(6): 64.
WANG Jin. Technical parameters analysis of straddle monorail turnout[J]. Railway Construction Technology, 2020(6): 64.

(上接第 289 页)

- LIU Heng. Experimental research on the influencing factors of the shear characteristics of the contact surface between coarse sand and concrete[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2020, 43(12): 142.
- [2] 于森, 任传斌, 李芳凝, 等. 溶洞地质体三维建模与注浆量定量分析[J]. 地质论评, 2021, 67(增刊1): 7.
YU Miao, REN Chuanbin, LI Fangning, et al. Three-dimensional modeling of karst cave geological body and quantitative analysis of grouting quantity[J]. Geological Review, 2021, 67(S1): 7.
- [3] 冯明辉, 陈虹宇, 吴贤国, 等. 某地区隧道岩溶区段施工处置对策分析[J]. 建筑技术, 2020, 51(5): 575.
FENG Minghui, CHEN Hongyu, WU Xianguo, et al. Construction technology of karst in construction of tunnel in a certain area[J]. Architecture Technology, 2020, 51(5): 575.
- [4] 邢志豪, 朱斌, 王健, 等. 溶洞注浆加固的空间属性对地铁盾构隧道建设安全的影响效应[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 52(4): 183.
XING Zhihao, ZHU Bin, WANG Jian, et al. Influence of spatial attribute of karst cave grouting reinforcement on the safety of subway shield tunnel construction[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 52(4): 183.
- [5] 张巍. 地铁隧道岩溶区处理方案及工程实践[J]. 土工基础, 2021, 35(4): 438.
ZHANG Wei. Engineering practice of metro tunnel construction in karst area[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(4): 438.

- [2] 李卓然, 解丽霞. 跨座式单轨曲线半径 100 m 换梁型道岔设计[J]. 铁道勘察, 2021, 47(5): 131.
LI Zhuoran, XIE Lixia. Design of straddle monorail curve radius 100 m substituted switch[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(5): 131.
- [3] 解丽霞. 跨座式单轨整体平转式道岔系统研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(5): 125.
XIE Lixia. Research on straddle monorail turnouts with integral horizontal rotation system[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(5): 125.
- [4] 杜子学, 左长永, 何希和. 跨坐式单轨列车与平移式道岔耦合作用力仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(6): 42.
DU Zixue, ZUO Changyong, HE Xihe. Analysis of coupling force simulation between straddle-type monorail train and sliding-type turnout[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(6): 42.

· 收稿日期:2022-05-24 修回日期:2022-09-26 出版日期:2024-07-10
Received:2022-05-24 Revised:2022-09-26 Published:2024-07-10
· 通信作者: 仵叔强, 正高级工程师, 5017392@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

- [6] 童朝锋, 魏芷阳, 孟艳秋. 基于 FLUENT 的垂向二维数值波浪水槽的造波效果[J]. 水运工程, 2020(3): 13.
TONG Chaofeng, WEI Zhiyang, MENG Yanqiu. Wave making effect of vertical two-dimension numerical wave tank based on FLUENT[J]. Port & Waterway Engineering, 2020(3): 13.
- [7] 胡志高, 吴一鸣, 王彦芳, 等. 基于 FLUENT 数值模拟的离心泵内冰浆两相流流动特性分析[J]. 流体机械, 2021, 49(4): 48.
HU Zhigao, WU Yiming, WANG Yanfang, et al. Flow characteristics analysis of ice slurry two-phase flow in centrifugal pump based on FLUENT numerical simulation[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(4): 48.
- [8] 翟之平, 杨忠义, 高博, 等. 基于 Mixture 模型的叶片式抛送装置内气固两相流模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 50.
ZHAI Zhiping, YANG Zhongyi, GAO Bo, et al. Simulation of solid-gas two-phase flow in an impeller blower based on Mixture model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 50.

· 收稿日期:2022-02-16 修回日期:2022-03-25 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-16 Revised:2022-03-25 Published:2024-07-10
· 第一作者: 余希明, 工程师, fish2005fly@163.com
通信作者: 陈俊生, 副教授, jschen@scut.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license