



深圳某管廊盾构施工岩溶处置技术研究与应用

于祥涛

(中铁二十局集团南方工程有限公司, 广东 广州 511300)

摘要:岩溶地层盾构施工风险较高,易出现盾构机倾覆、地表变形大等问题。文章依托深圳市 16 号线共建管廊碧新路绕行段盾构施工项目,在探明岩溶发育特征、规模与充填特性的基础上,选取 3 个具有代表性的溶洞进行试验研究,形成一套完备的岩溶处置施工工艺,并总结了岩溶处置时注浆加固异常情况的应对措施与注浆效果检测方法。对盾构掘进过程中地表变形与掘进姿态进行动态监测与分析,结果表明:所确定的岩溶处置方案合理、高效。本文成果可为管廊盾构施工岩溶处置提供技术参考。

关键词:管廊; 盾构施工; 注浆加固; 岩溶; 物探

中图分类号:U455

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)02-0025-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.02.018

Research and application of karst disposal technology in a tunnel shield construction in Shenzhen

YU Xiangtao

(China Railway 20th Bureau Group Southern Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511300, Guangdong, China)

Abstract: The shield construction in karst formations carries a high risk, with potential issues such as shield machine overturning and significant surface deformation. This paper is based on the shield construction project of the Bixin Road bypass section of the utility tunnel jointly built on Line 16 in Shenzhen. After investigating the developmental characteristics, scale, and filling properties of the karst, representative karst caves are selected for experimental research. A comprehensive construction process for karst treatment is developed, and measures for handling abnormal grouting reinforcement situations during karst treatment, as well as methods for testing the effectiveness of grouting, are summarized. During the shield tunneling process, dynamic monitoring and analysis of surface deformation and tunneling posture are conducted. The results indicate that the determined karst treatment scheme is reasonable and efficient. The findings of this paper can provide technical references for karst treatment in utility tunnel shield construction.

Key words: pipe gallery; shield tunneling; grouting reinforcement; karst; geophysical prospecting

岩溶区盾构施工过程中,若对岩溶处置不当,易出现地表变形大、盾构机栽头及地面塌陷等风险,因此,研究科学合理的盾构施工岩溶处置方案具有十分重要的价值^[1-2]。张博^[3]依托大坦沙岛项目,研究了隧道内二次注浆填充、地面注浆填充等溶洞处理方法,并给出了溶洞处置施工要点与检测标准;崔学忠^[4]依托昆明轨道交通 4 号

线项目,研究了基于孔间层析成像和高密度电法的岩溶探测方法,并从盾构选型、岩溶预加固、洞内注浆加固及施工参数控制等方面研究了岩溶区盾构掘进岩溶处置及盾构掘进方案;王海林等^[5]依托沅古坪隧道工程,在明确地质情况与周围环境的基础上,构建了岩溶隧道涌水防治关键技术;徐桂林^[6]依托合罗仙关 2# 隧道工程,分析

收稿日期:2024-03-11

基金项目:陕西省重点研发计划资助项目(2022SF-375),陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JQ-375)

作者简介:于祥涛(1989—),男,工程师,从事盾构施工技术、项目管理及施工风险智能管控等方面的工作。

研究了基于计算机软件的快速、自动化非接触监控量测技术；崔明^[7]基于广州地铁 12 号线项目，研究了强发育岩溶处理范围、注浆参数的确定方法，并对盾构机进行了适应性改造；吴发展^[8]研究了溶洞位置对隧道稳定性的影响，确定了合理的溶洞预处理方案。本文在既有研究基础上，依托深圳市 16 号线共建管廊项目，在明确岩溶分布特征、发育规模与填充特性的基础和基于岩溶处置试验段的研究上，形成包含岩溶处置施工工艺、注浆参数选择、注浆异常处理和效果检测的岩溶处置技术，在进一步分析研究盾构掘进过程中的地表变形数据与姿态数据的基础上，论证所提岩溶处置技术的可靠性，以为管廊盾构施工岩溶处置提供一点参考。

1 工程概况

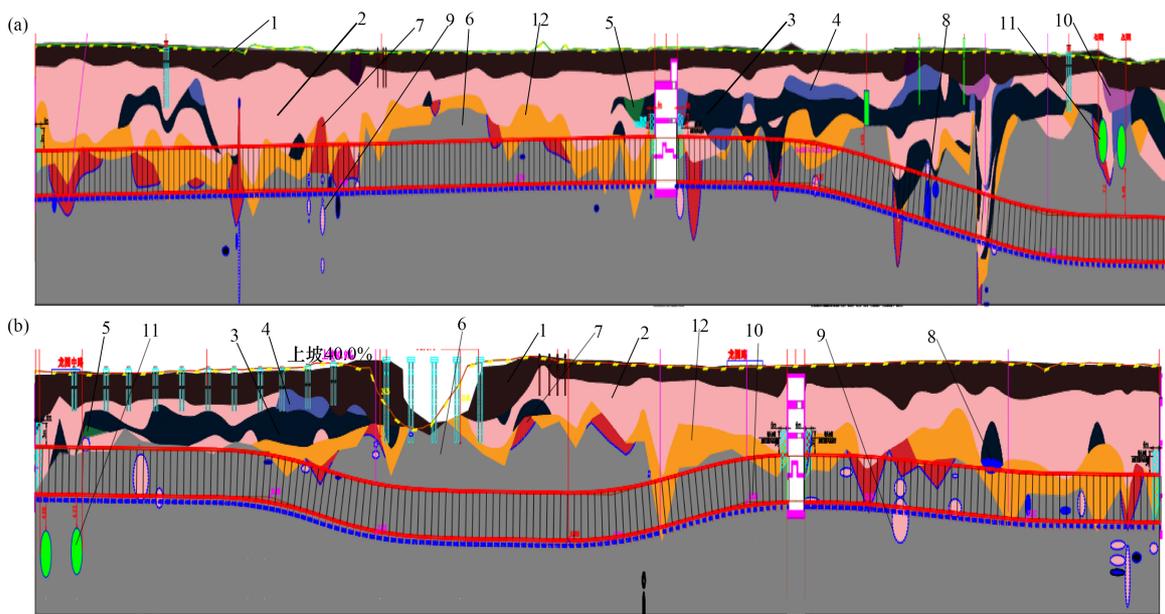
深圳市 16 号线共建管廊综合井 9(不含)~综合井 10(不含)，长约为 2.850 km，包括 3 个明挖工作井，两个盾构区间(分别为综合井 10~绕行段综合井 1、行段综合井 1~综合井 9)，拟投入复合式土压平衡盾构 1 台，隧道内、外径分别为 6.0、6.7 m，管片厚度为 350 mm，每环管片有六

分块，环宽为 1.5 m。综合井 10~综合井 1 管廊盾构区间覆土深度范围为 12.11~22.30 m，地质自上而下主要为粉质黏土素填土、粉质黏土、粉细砂、微风化灰岩，灰岩中揭露岩溶发育，其中洞身穿越主要地质为微风化灰岩及粉质黏土，相应的地质剖面如图 1(a)所示。综合井 1~综合井 9 管廊盾构区间覆土深度范围为 7.75~17.64 m，地质自上而下主要为粉质黏土素填土、粉质黏土、粉细砂、中粗砂、含砾粉质黏土、微风化灰岩，灰岩中揭露岩溶发育，其中洞身主要穿越地质为微风化灰岩，相应的地质剖面如图 1(b)所示。

2 盾构区间岩溶特征

2.1 岩溶发育特征

岩溶专项物探过程中解译了大量溶洞，主要为中等、强烈发育。其中，钻探揭露的溶洞在物探过程中均有反映。物探解译溶洞洞高为 2.22~14.27 m，平均 5.98 m，洞跨为 3.04~31.45 m，平均 9.79 m，溶洞洞顶埋深为 3.23~30.07 m，对应高程为 4.08~24.82 m，溶洞洞底埋深为 7.83~34.73 m，对应高程为 -0.05~20.75 m，顶板厚度为 0.56~19.04 m。



(a) 综合井 10~绕行段综合井 1 地质剖面；(b) 综合井 1~绕行段综合井 9 地质剖面

1—粉质黏土素填土；2—粉质黏土；3—中粗砂；4—粉细砂；5—卵石；6—微风化灰岩；

7—含碎石粉质黏土（溶槽堆积物）；8—砾砂；9—溶洞；10—淤泥质粉质黏土；11—圆砾；12—含砾粉质黏土。

图 1 综合井 9(不含)~综合井 10(不含)两区间地质剖面

2.2 岩溶发育规模

综合井 1~综合井 9 钻孔见洞率约为 40.00%，综合井 10~综合井 1 钻孔见洞率约为 30.16%。综合井 1~综合井 9 探明的溶洞个数为 85 个，综合井 10~综合井 1 探明的溶洞个数为 145 个，溶洞平面尺寸与高度的分布情况如图 2 所示。

2.3 溶洞充填特性

钻孔揭露的两个盾构区间溶洞充填情况如表 1 所示。由表 1 可知：溶洞充填无明显规律。溶洞充填形式主要为无填充、粉质黏土填充和砂填充，其中填充物为粉质黏土的溶洞占比较大。

表 1 溶洞充填特征

不同区间	无填充	粉质黏土填充	砂填充	填充物为其他
综合井 10~ 绕行段综合井 1	22	87	36	0
综合井 1~ 绕行段综合井 9	17	32	36	0

3 岩溶处置研究

3.1 岩溶处置施工工艺

在盾构施工过程中，进行岩溶地层处置时，需结合地勘报告、物探及现场地质钻探明确地下管线等构筑物及岩溶的位置与尺寸。在此基础上，确定注浆孔位置并进行钻孔注浆。注浆完成后，对注浆效果进行检查，以确保岩溶的合理处置。详细的盾构施工岩溶处置施工工艺如图 3 所示。

3.1.1 注浆孔布设原则

在岩溶处置过程中，注浆孔布设位置和个数取

决于溶洞的平面尺寸。当钻孔揭露的溶洞 x 、 y 边（投影面）均小于 2 m 时，在钻孔处布设 1 个注浆孔，如图 4(a) 所示；当 $3\text{ m} > x > 2\text{ m}$ 且 $3\text{ m} > y > 2\text{ m}$ 时，围绕钻孔布设 3 个注浆孔且呈三角形，间距为 $2 \times 2\text{ m}$ ，如图 4(b) 所示；当 $5\text{ m} > x > 3\text{ m}$ 且 $5\text{ m} > y > 3\text{ m}$ 时，围绕钻孔呈梅花形布设注浆孔，如图 4(c) 所示；当 $x > 5\text{ m}$ 且 $y < 5\text{ m}$ 时，围绕钻孔呈梅花形布设注浆孔且探边至结构外 50~100 cm，如图 4(d) 所示；当 $x > 5\text{ m}$ 且 $y > 5\text{ m}$ 时，钻孔呈梅花形布设注浆孔，探边至结构外 3 m，并布设间距 6~7 m 的下料孔，如图 4(e) 所示。

3.1.2 注浆方法

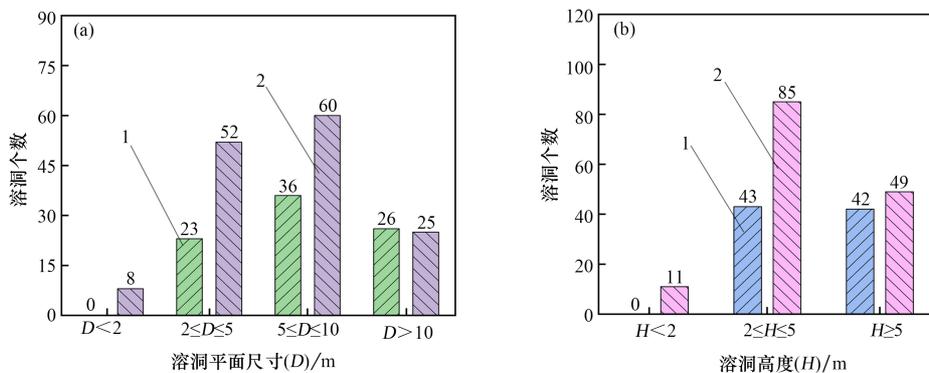
溶洞注浆加固前，先采用双液浆进行封边处理形成止浆墙，再采用袖阀管注浆。注浆液选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。在注浆过程中，以先稀浆后浓浆的原则动态调整水灰比。注浆时，采用跳孔注浆法以防止窜浆，并在全孔段注浆完成后，间歇 10~30 min 后进行第二次注浆。注浆结束后，对注浆孔采用水灰比为 0.5:1.0 的浓水泥浆进行封孔。

3.1.3 注浆过程异常处理

(1) 注浆中断：立刻确定注浆中断原因，及早恢复注浆。若不能及时恢复，应立即冲洗芯管。

(2) 大量漏浆：采用低压间歇注浆法进行灌注，间歇时间为 6~8 h。采用水泥-水玻璃等速凝材料进行灌注，从而缩短浆液凝固时间，提高注浆速度。若需要，可将大孔隙用砂浆等充填材料封堵。

(3) 串浆：加大孔距以防串浆。当发生串浆



(a) 溶洞平面尺寸分布情况；(b) 溶洞高度分布情况

1—综合井 1~综合井 9；2—综合井 10~综合井 1。

图 2 两盾构区间岩溶发育规模

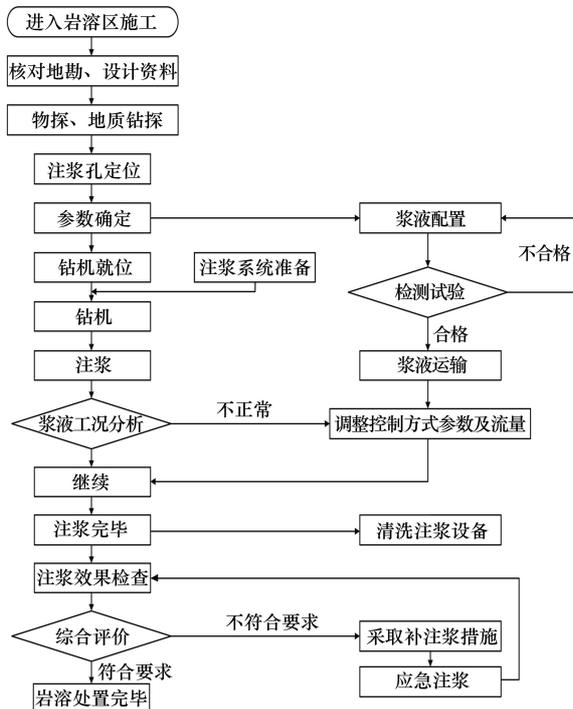
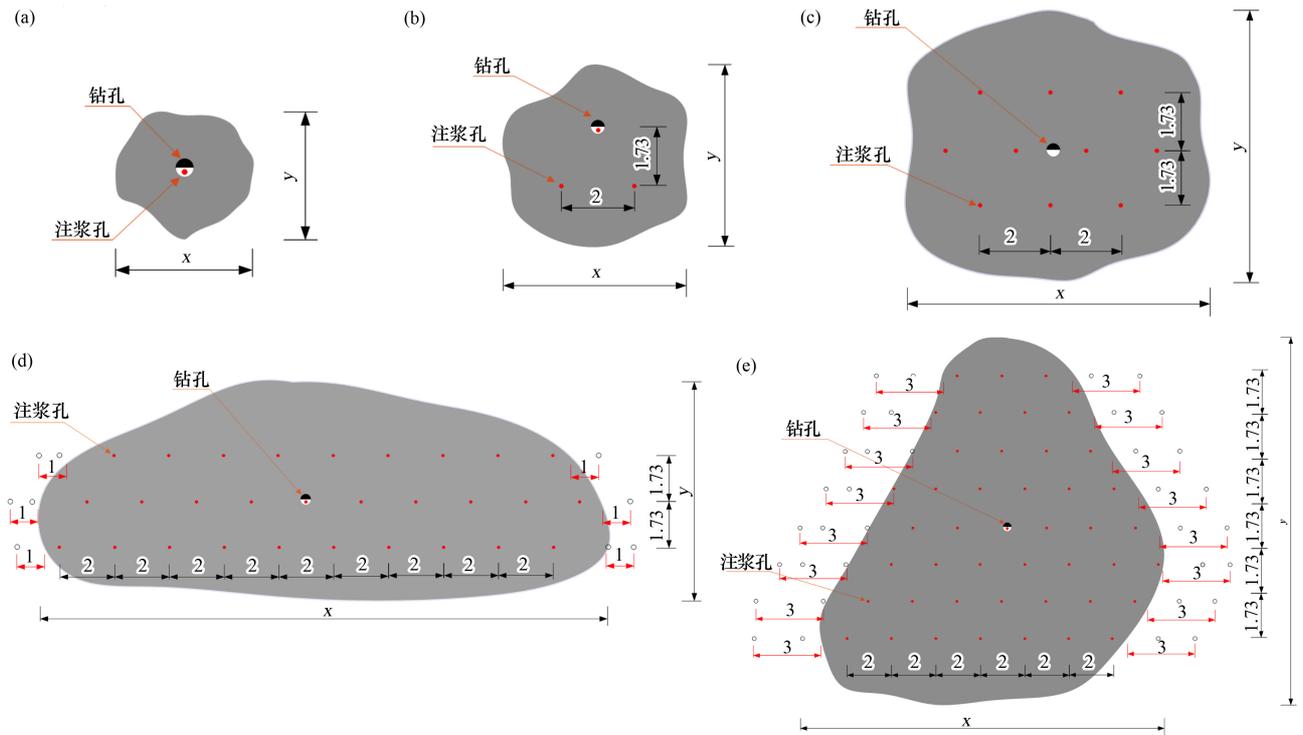


图 3 盾构施工岩溶处置施工工艺

时，条件允许的情况下可同时注浆，注意需一泵一孔；反之，则堵住串浆孔，待完成注浆孔注浆，



(a) 溶洞 x 、 y 边均小于 2 m 时，注浆孔布设方法；
 (b) $3\text{ m} > x > 2\text{ m}$ 且 $3\text{ m} > y > 2\text{ m}$ 时，注浆孔布设方法；
 (c) $5\text{ m} > x > 3\text{ m}$ 且 $5\text{ m} > y > 3\text{ m}$ 时，注浆孔布设方法；
 (d) $x > 5\text{ m}$ 且 $y < 5\text{ m}$ 时，注浆孔布设方法；
 (e) $x > 5\text{ m}$ 且 $y > 5\text{ m}$ 时，注浆孔布设方法

图 4 岩溶处置注浆孔布设

再对串浆孔进行注浆。

(4) 地表冒浆：在发生地表冒浆时，注浆方法可选用低压或自流式。同时，需要提高浆液浓度并在必要时加入细沙等材料，待冒浆处被控制住后，再逐步提高注浆压力并间歇注浆。

3.2 试验段岩溶处置方案

溶洞充填状态包括无填充、半填充和全填充 3 种状态。为确定最优的施工参数、施工机具及人员组合，综合考虑工程设计图纸、地勘报告、区间周围环境及对沿线岩溶现场地质雷达扫描勘察，选取岩溶 R54、R66、R68 号孔作为试验段进行工程的岩溶处置方案研究，试验段溶洞概况如表 2 所示。

在注浆加固前，无填充、半填充溶洞需进行素混凝土填充。通过输送泵将素混凝土经高压输送管送入溶洞内。具体的施工步骤：测量放线→钻孔布置→钻孔→溶洞试灌→素混凝土泵送→灌注孔封孔。注浆压力参考值如表 3 所示，并在实际施工中动态调整。

表 2 试验段溶洞概况统计

岩溶发育编号	岩溶发育高度	岩溶发育跨度	顶板厚度	充填状态	处置情况
R54	5.70	6.20	5.14	无填充	充填 + 注浆
R66	8.73 ~ 9.40	14.22 ~ 15.88	1.65 ~ 1.77	全填充	注水泥浆
R68	4.89	5.94	1.16	半填充	充填 + 注浆

表 3 注浆压力参考值

注浆阶段	注浆压力/MPa
周边孔第一轮	0.2 ~ 0.3
周边孔终灌	0.6 ~ 0.8
中央孔第一轮	0.2 ~ 0.3
中央孔终灌	0.8 ~ 1.0

3.3 注浆效果检测

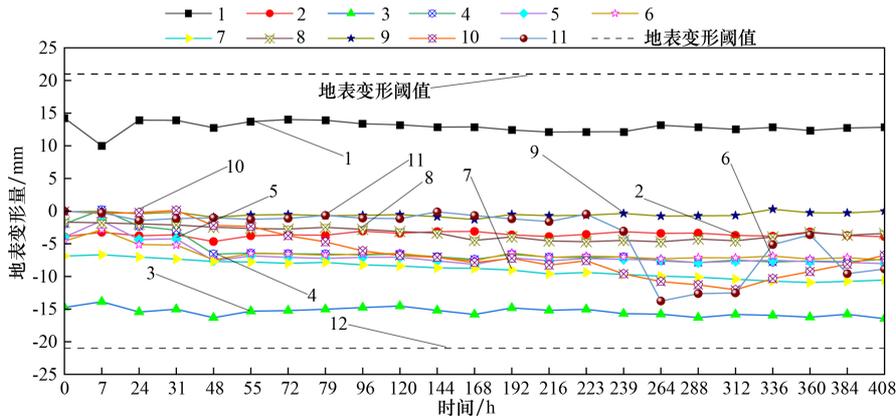
溶洞注浆效果检测应在注浆结果后的 28 d 进行。通过对检验性钻孔进行注浆前后的强度对比来判断注浆效果，其中检验性钻孔数据应大于 3，且不小于注浆孔数量的 5%。值得注意的是，当岩溶情况较复杂时，应增加检验性钻孔数量^[9-10]。注浆加固后，每个溶洞至少检测 1 次，且检验性钻孔应布置在注浆孔附近(2~3 m)。在此基础上，应对注浆效果进行渗透性评定，其检验点数量应

大于 3，且不小于注浆孔数量的 2%。

3.4 盾构地表变形与掘进姿态分析

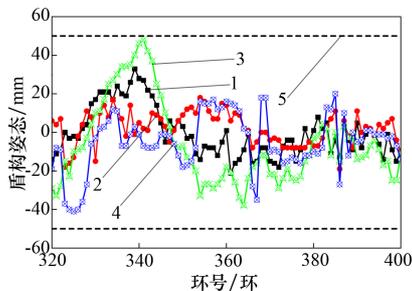
采用上述岩溶处置方案进行盾构施工过程中的溶洞处置后，盾构施工引起的地表变形如图 5 所示。由图 5 可知：盾构地表变形均控制在 ±21 mm 的阈值范围内，说明所设计的岩溶区盾构施工岩溶处置方案合理，能够确保管廊的安全施工。

盾构姿态参数主要包括切口水平、切口垂直、盾尾水平和盾尾垂直。图 6 为对溶洞进行注浆填充后，分布于 320 环至 400 环盾构掘进的姿态参数演化过程。由图 6 可知：4 个盾构姿态参数均控制在 ±50 mm 的阈值范围内，说明所设计的岩溶区盾构施工岩溶处置方案合理，能够确保盾构施工成型隧道的质量。



1~11—分布于 320~400 环隧道轴线的 11 个监测点；12—地表变形阈值。

图 5 盾构掘进地表变形分析



1—切口水平；2—切口垂直；3—盾尾水平；4—盾尾垂直；5—盾构姿态阈值。

图 6 盾构掘进姿态数据分析

4 结 语

为确保岩溶地层盾构施工的安全性，本文依托深圳市 16 号线共建管廊项目开展岩溶处置研究。该工程岩溶平面尺寸以 2~5 m 和 5~10 m 居多，溶洞高度以 2~5 m 居多。溶洞填充无明显规律，且主要为无填充、粉质黏土填充和砂填充。为确定不同填充特性下合理的施工参数与材料选用，针对无填充、半填充和全填充等 3 种溶洞充

填形式开展了试验段研究,确定了最优的盾构掘进岩溶处置方案。通过对盾构掘进过程中的地表变形数据与掘进姿态数据进行分析可以表明,所确定的岩溶处置方案能够较好地控制地表变形与掘进姿态。本研究形成了一套完备的岩溶处置施工工艺,基于溶洞尺寸确定了钻孔的布置位置与个数,并总结了施工过程中的注浆异常情况处理与注浆效果检测方法,研究成果可为管廊盾构施工岩溶处置提供技术参考。

参考文献:

- [1] 韩艾芳. 基于克里金法的地铁车站场区岩溶分布规律研究[J]. 工程建设,2020,52(4):38-42;54.
- [2] 张志亮. 岩溶发育区地下综合管廊盾构施工注浆技术[J]. 石材,2023(12):13-15;89.
- [3] 张博. 岩溶区地铁盾构隧道施工关键技术研究[J].

中华建设,2024(2):110-112.

- [4] 崔学忠. 昆明轨道交通盾构工程岩溶处置技术研究与应用[J]. 工程建设,2019,51(12):66-73.
- [5] 王海林,王木群,傅鹤林,等. 复式向斜盆地构造富水岩溶台地特长隧道设计关键技术研究[J]. 公路工程,2023,48(3):61-67.
- [6] 徐桂林,彭学先. 非接触监控量测技术在岩溶隧道施工中的应用[J]. 湖南交通科技,2018,44(4):160-164.
- [7] 崔明,于洪彪,王超,等. 岩溶强发育区盾构隧道施工技术研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(1):74-79.
- [8] 吴发展,刘道炎. 城市地铁穿越岩溶地段盾构掘进技术[J]. 青海交通科技,2022,34(4):152-158.
- [9] 殷颖,田军,张永杰. 岩溶隧道灾害案例统计分析研究[J]. 公路工程,2018,43(4):210-214;273.
- [10] 苏媛. 地铁盾构区间岩溶处治技术的探讨[J]. 北方建筑,2021,6(6):20-23.

(上接第 20 页)

5 结 论

(1)使用 ABAQUS 软件较好地模拟未加固钢梁和贴板加固钢梁的特征荷载、破坏模式及荷载-挠度曲线,其中屈服荷载模拟值与试验值的相对误差为 3.5%,极限荷载模拟值与试验值的相对误差为 4.5%。

(2)纯弯段较长时,跨中挠度较大,但纯弯段长度对界面应力无影响,它对剥离弯矩的影响也很小,尤其在纯弯段长度达到一定程度后。

(3)保持 CFRP 板伸长比不变,随着剪跨比的增大,破坏时其截面抗弯承载力逐渐增大,加载点挠度也明显增大。

(4)保持 CFRP 板伸入长度不变,随着剪跨比的增大,相同弯矩下加载点的挠度相应增大,而剥离弯矩先增大后减小。

(5)通过对 CFRP 板纯黏贴加固钢梁的界面剥离过程及剥离抗力分析,建议采用 G 字夹型端部机械锚固装置加固 CFRP 板纯黏贴钢梁。在人力扭

矩扳手可以操作的扭矩范围内,对 G 字夹施加一定螺栓预紧力,可获得抵抗剥离应力的夹持预应力。

参考文献:

- [1] 艾腾腾,刘继明,宋晨晨,等. 考虑黏结滑移的箱型钢骨混凝土纯扭构件 ABAQUS 模拟方法研究[J]. 工程建设,2016,48(5):14-19.
- [2] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):24-36.
- [3] 邓军,黄培彦. CFRP 板加固钢梁界面应力的理论与试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(7):10-14.
- [4] 李鹏,徐德新,张汉民. 碳纤维材料加固钢梁的试验研究[J]. 工业建筑,2004,34(7):91-92;98.
- [5] 彭福明. 纤维增强复合材料加固修复金属结构界面性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
- [6] 彭福明,郝际平,杨勇新,等. CFRP 加固钢梁的有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006,38(1):18-22;68.