

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.03.008

岩溶区域城市轨道交通控制保护区范围研究

杨祉蕙¹, 雷刚¹, 成双田¹, 何建凯²

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037; 2. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101)

摘要: 针对岩溶地质城市轨道交通控制保护区范围扩大程度不明确的问题, 提出岩溶区域控制保护区具体调整方案。从岩溶不良地质影响既有结构安全的机理出发, 通过对指导性行业标准和岩溶地面塌陷机理研究, 确定岩溶区域城市轨道交通控制保护区范围的3个重要指标: 外部作业影响范围、岩溶地面塌陷影响范围和既有城市轨道交通结构易受影响范围。通过几何分析, 确定外部作业诱发岩溶地面塌陷进而引发既有城轨结构安全风险的极限范围, 这一范围即为岩溶区控制保护区范围。最终提出两种典型岩溶地质条件下明挖车站与盾构区间的控制保护区范围计算模型, 并以深圳市轨道交通16号线为例进行计算, 计算结果可以为深圳及其他岩溶区域城市轨道交通项目的运营管理提供参考。

关键词: 城市轨道交通; 控制保护区; 岩溶; 岩溶地面塌陷; 运营管理

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)03-0054-07

Scope of Control and Protection Areas for Urban Rail Transit in Karst Regions

YANG Zhihui¹, LEI Gang¹, CHENG Shuangtian¹, HE Jiankai²(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037;
2. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101)

Abstract: A specific adjustment plan for the control and protection areas in karst region was proposed in response to the problem that the degree of expansion of the control and protection areas for urban rail transit in karst geology was unclear. Starting from the mechanism of karst adverse geology affecting the safety of existing structures, through the study of guiding industry standards and the mechanism of karst ground collapse, three important indicators of the scope of control and protection areas for urban rail transit in karst region were determined: the scope of influence of external operations, the scope of influence of karst ground collapse and the scope of susceptibility to influence of existing urban rail transit structures. Based on geometric analysis, the maximum scope where the existing urban rail structure suffered a safety risk caused by karst ground collapse, which is induced by external operations, is determined. This maximum scope is adopted as the scope of the control and protection areas in the karst region. Finally, the control and protected areas scope calculation models of metro station and interval tunnels in two typical karst geological conditions are proposed. Calculations were carried out on Shenzhen Rail Transit Line 16 as an example, and the results can provide a reference for the operation and management of urban rail transit projects in Shenzhen

收稿日期: 2024-08-13 修回日期: 2025-01-02

第一作者: 杨祉蕙, 女, 硕士, 工程师, 主要从事城市轨道交通研究, zhh_young@163.com

通信作者: 雷刚, 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地下结构研究, 10851383@qq.com

基金项目: 科技部重点研发计划项目子课题(2022YFC3003305)

引用格式: 杨祉蕙, 雷刚, 成双田, 等. 岩溶区域城市轨道交通控制保护区范围研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 54-60.

YANG Zhihui, LEI Gang, CHENG Shuangtian, et al. Scope of control and protection areas for urban rail transit in karst regions[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(3): 54-60.

and other karst regions.

Keywords: urban rail transit; control and protection areas; karst regions; karst ground collapse; operations management

1 研究背景

岩溶是一种常见的不良工程地质，特别是覆盖型岩溶区域，前期具有风险隐蔽的特点，一旦发生岩溶地面塌陷，又往往具有突发、高危的特点，极易对地下结构造成毁灭性的破坏，给我国的城市轨道交通建设带来了挑战。深圳市是岩溶区域城轨建设代表城市之一，其东北部的龙岗、坪山和大鹏(葵涌)等区域分布有可溶岩，且以龙岗区发育最强，属于岩溶塌陷多发区。根据深圳市 2016—2035 年线网规划及岩溶大致分布范围，有多条既有、在建或规划线路穿过岩溶区。如 2022 年底开通的深圳市轨道交通 16 号线工程，岩溶线路长约 13.3 km，涉及 23 个工点，田心车辆段岩溶强烈发育范围约 15.2 万 m^2 ，如图 1 所示。



图 1 深圳市城市轨道交通 16 号线工程岩溶区站点分布平面示意

Figure 1 Schematic diagram of the distribution of stations in the karst regions of Shenzhen Urban Rail Transit Line 16

随着城市轨道交通的大规模建设，大量学者针对岩溶不良地质条件下城轨建设进行了研究。苏茂鑫等^[1]提出针对岩溶地质地铁隧道建设的洞内雷达加洞外高密度电法与雷达法相结合的综合预报方法；蒋磊等^[2]针对复杂岩溶地层特殊地质条件，考虑水下高压等因素影响，对地铁盾构选型进行研究；邓忠等^[3]对覆盖型岩溶区盾构工程风险成因、地质预报手段进行分析总结，并提出不同灾害对应的处理对策；温忠义等^[4]针对岩溶区地铁不均匀沉降问题，研究对地铁隧道下方溶洞灌浆提升地基承载力的关键技术，并提出了注浆量和溶(土)洞体积的经验关系；Sun 等^[5]提出一种包含频率与后果两个维度和四种概率模型的二维

云模型来量化岩溶区地铁隧道建设风险等级；TAO 等^[6]基于现场监测数据分析岩溶区隧道近距离下穿既有结构的施工影响；PENG^[7]和 YANG^[8]等分别基于深圳、广州的项目研究岩溶区地铁深基坑涌水的原因与危害。部分学者也针对隐伏岩溶对运营阶段城轨结构的安全展开了研究^[9-10]，但这些研究主要是针对运营隧道内列车动荷载导致的具体岩溶与既有结构之间的相互作用和力学响应。实际在地铁建设过程中，沿线周边范围内的溶(土)洞都进行了填充加固处理。因此，沿线周边岩溶引发运营期城轨结构风险的可能性较小，一种更普遍的情况是外部工程作业引起沿线较远处的岩溶灾害进而危害城轨结构安全。吴晟堂等^[11]以深圳市 3 个岩溶地面塌陷事件为例，通过半定量方法得到了岩溶地下工程地质环境影响范围计算经验公式，但这种方法主要是针对地质灾害影响范围，没有考虑既有结构本身抗风险能力。为了进一步提升深圳地铁运营管理技术水平，确保岩溶区轨道交通周边工程施工对既有线路运营安全风险可控，开展岩溶地质条件下的安全保护区范围研究是迫切和必要的。

城市轨道交通控制保护区(也称“安全保护区”)通常指为保护城市轨道交通结构的正常使用和安全，在其结构及周边设置的控制和保护区域。行业标准《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)^[12]针对不同的城轨结构分别提出了 50、30、10 m 的要求，但以上要求均为一般条件下(非岩溶地质)的控制保护区要求。岩溶是一种典型的不良地质，因此，在条文说明中提到对于特殊工程地质条件应适当扩大城市轨道交通控制保护区范围。

然而目前对于控制保护区具体如何扩大的问题缺少定量的方法，因此，在实际执行过程中缺乏可操作性。城市轨道交通控制保护区是一种城市管理手段。太小的控制保护区范围不利于城轨结构安全的保障，过大的控制保护区范围不利于城轨沿线的开发建设。因而亟须一种可量化的、在保证安全基础上最大限度保证沿线开发建设效率的控制保护区计算方法。本文从岩溶地面塌陷的机理出发，结合规范要求，分析外部作业、岩溶、既有结构之间的关系，提出一种具有实操性的岩溶区域城市轨道交通地铁安全保护区计算方法，为岩溶区地铁运营管理提供参考。

2 研究方法

如前所述城市轨道交通控制保护区是一种城市管理手段，主要是用于确定城轨沿线周边多大范围内新建工程需要报备。考虑到岩溶不良地质与一般地质的主要不同在于：一般情况下，新建的外部工程扰动了既有结构周边地层，进而影响到既有城轨结构运营安全；而岩溶情况下，新建的外部工程可能扰动了某一距离既有城轨结构较远的未处理的溶(土)洞周边地层，引发了岩溶地面塌陷，岩溶地面塌陷又扰动了既有结构周边的地层，从而影响到既有城轨结构运营安全。因此，研究岩溶区域城市轨道交通控制保护区的关键就是研究如何将岩溶地面塌陷的影响在物理力学分析模型中体现出来。

本文从城市轨道交通安全控制要求与岩溶地面塌陷机理两个方面进行分析，研究如何在城市轨道交通控制保护区计算模型中体现岩溶地面塌陷的影响。

2.1 城轨结构安全控制要求

城市轨道交通结构的安全控制要求包括外部作业影响等级、外部作业净距控制管理指标和结构安全控制指标^[12]。外部作业等级和外部作业净距控制管理指标反映的是外部作业与既有结构之间的空间位置关系，结构安全控制指标是具体安评后的结果指标要求。外部作业净距控制管理指标一般针对某种施工措施或小型作业，控制距离较短，而外部作业等级则是针对大型工程作业，如基坑工程、隧道工程等，控制距离较大，可以作为一种判断是否进行、如何进行评估的管理要求。由于一般地质条件下的控制保护区范围并没有明确的计算方法，拟参考外部作业等级的确定方法来考虑外部作业诱发岩溶地面塌陷进而引发既有城轨结构安全风险的极限范围。

外部作业影响等级分为特级、一级、二级、三级、四级共 5 个级别，只有当外部作业等级为特级、一级时，才必须进行安全评估；当等级为二级时，宜进行安全评估；当等级低于二级时，无需进行安全评估，如表 1 所示^[12]。

表 1 外部作业影响等级划分^[12]

Table 1 Classification of the impact level of external operations^[12]

影响分区 外部作业工程	接近程度			
	非常接近	接近	较接近	不接近
强烈影响区	特级	特级	一级	二级
显著影响区	特级	一级	二级	三级
一般影响区	一级	二级	三级	四级

外部作业等级由外部作业的工程影响分区和既有结构的接近程度决定。这两个指标都是表示对应工程的一个“范围”，外部作业的工程影响分区表示该工程能影响多大范围的地层，根据影响大小不同划分为 3 种影响区；既有结构的接近程度反映的是距离既有结构多远的扰动能对其造成影响，根据影响程度划分为 4 种接近范围。因此，规范中一般情况下的外部作业对既有结构造成影响的分析可以抽象为图 2(a)所示的模型(工程影响范围与结构接近范围可以重叠，此处为了表示清楚未表征重叠部分)。

如前所述，岩溶区的特点是新建工程可能通过引发岩溶地面塌陷间接地对既有结构造成影响。基于外部作业影响等级的划分模型，在这一模型中纳入岩溶地面塌陷物理模型来研究岩溶区域城市轨道交通控制保护区，如图 2(b)所示。外部工程的影响分区和既有结构的接近范围都与其工程类型有关，然而外部工程对于运营管理而言是一个非自主控制的变量，考虑到基坑工程是岩溶区域影响最为显著的外部作业之一，以基坑工程为例进行分析。

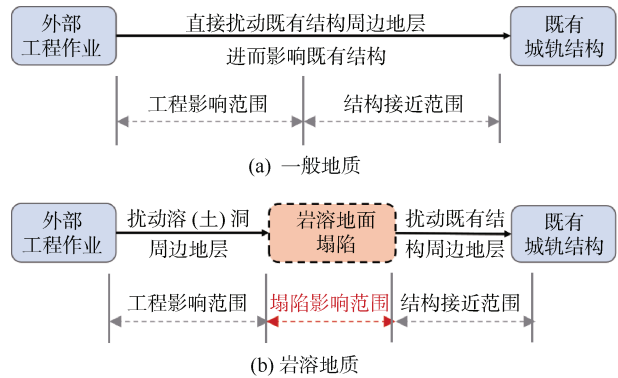


图 2 外部作业对既有城轨结构的影响分析模型
Figure 2 Analytical model of the impact of external operations on established urban rail transit structures

由于本文研究的是外部作业影响到岩溶进而影响既有结构的极限工况，且外部作业为基坑，“一般影响区+(非常)接近”与“强烈影响区+不接近”的安评组合很难实现。因此，将显著影响区与一般影响区的分界位置作为外部作业影响到岩溶层的临界位置，将既有结构较接近与不接近的分界位置作为既有结构受岩溶影响的临界位置，不会过于保守影响审批效率。

2.2 岩溶地面塌陷影响范围

岩溶地面塌陷一般分为 3 种类型，一是土洞顶板

失稳引发的土洞型塌陷，二是砂颗粒通过岩溶通道漏失引发的沙漏型塌陷，三是软弱土体沿通道发生流动变形的泥流型地面塌陷^[13]。针对深圳岩溶区的地质条件，仅考虑沙漏型塌陷^[14]和土洞型塌陷两种岩溶地面塌陷类型。

2.2.1 沙漏型地面塌陷

如图 3 所示，沙漏型地面塌陷模型与计时所用的沙钟类似，一般发生在覆盖层为低黏聚力的砂层岩溶区。

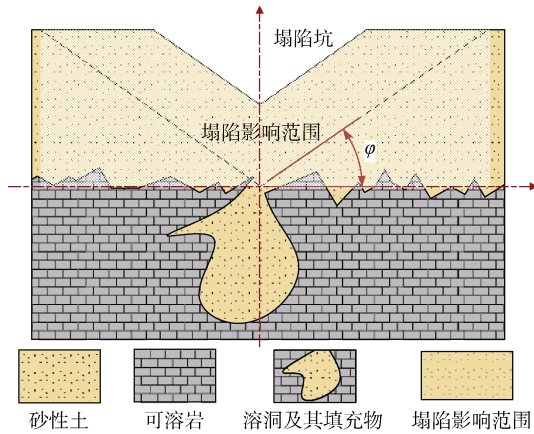


图 3 沙漏型岩溶地面塌陷机理与影响范围
Figure 3 Mechanism and influence area of hourglass type karst ground collapse

沙漏型塌陷的影响范围可以简化为由岩溶开口边界水平对称向上延伸的两条斜线，斜线与水平方向的夹角为砂体的内摩擦角^[15]。

2.2.2 土洞型地面塌陷

土洞型塌陷通常发生在覆盖层为黏聚力较高黏性土的岩溶区域，这种黏性土在发生土颗粒漏失后往往可以自成拱。

如图 4 所示，由于土洞顶板的破坏形式往往是土洞拱顶土体先发生拉张破坏，因此其塌陷型式以拱顶中部塌落，并向上逐步切穿地表，最终形成坑壁较陡的桶状或坛状塌陷坑^[16]。土洞型塌陷的影响范围可以比较明确地表示为由土洞外轮廓向上延伸的垂直垂线。

3 岩溶区控制保护区计算模型

第 2 章通过对行业标准解读和对两种典型岩溶地面塌陷模型研究，确定了外部作业影响到岩溶层的临界位置、既有结构受岩溶影响的临界位置和岩溶地面塌陷影响范围。按照图 2 思路，通过分情况将这些临界位置落在断面图上进行几何分析，即可获得不同地质条件、不同城轨结构的控制保护区范围计算公式。

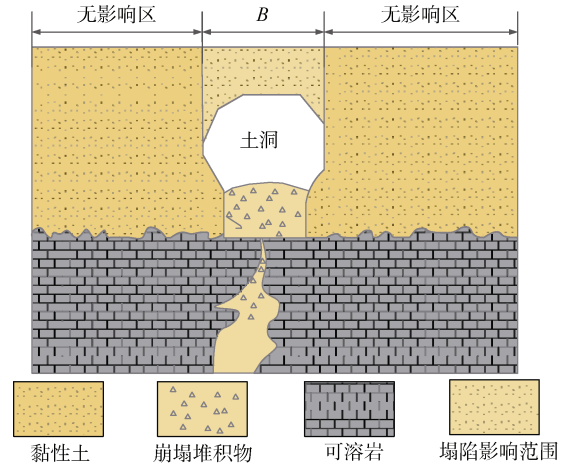


图 4 土洞型岩溶地面塌陷机理与影响范围
Figure 4 Mechanism and influence area of earth-cave type karst ground collapse

3.1 地下区间隧道控制保护区模型

区间隧道的接近程度与施工方法有关，考虑到单线区间施工方法对于控制保护区结果的影响不大，出于简便，矿山法隧道受岩溶影响的临界位置也遵循盾构、顶管法隧道的计算方式，取 3 倍等效洞径 $D = 2\sqrt{s/\pi}$ 。其中， s 为矿山法隧道面积。

3.1.1 沙漏模型

由于沙漏型塌陷的诱因一般是外部工程作业影响到岩溶通道开口处覆盖层的稳定性，所以笔者认为当岩溶通道开口处位于外部工程作业的影响区内时，才会发生沙漏型塌陷。因此，将外部作业基坑、溶洞、区间隧道落到统一断面上，其极限情况为基坑影响范围边线与岩溶通道中线重合、沙漏型岩溶地面塌陷影响范围斜线与区间隧道受影响的接近范围恰好相切，如图 5 所示。

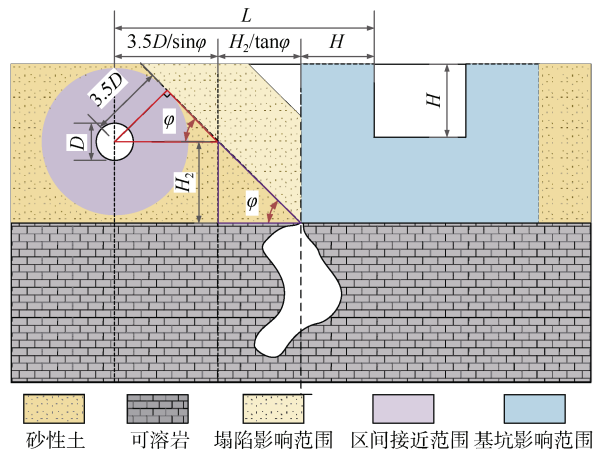


图 5 沙漏型区域区间的控制保护区计算模型
Figure 5 Computational modeling of control and protect areas for metro intervals in hourglass type regions

通过简单的平面几何分析, 此时基坑外边线与既有结构外边线的距离为:

$$L = 3.5D / \sin \varphi + H_2 / \tan \varphi - 0.5D + H \quad (1)$$

式中, L 即为岩溶区域城轨结构控制保护区范围长度, m ; D 为区间隧道等效直径, m ; H 为外部作业基坑开挖深度, m ; H_2 为隧道中心到土岩界面的距离, m ; φ 为覆盖砂层的内摩擦角。

3.1.2 土洞模型

由于土洞型塌陷的诱因一般是外部工程作业影响到覆盖层中土洞的稳定性, 所以笔者认为当土洞边界位于外部工程作业的影响区内时, 才会发生土洞型塌陷。因此, 将外部作业基坑、土洞、区间隧道落到统一断面上, 其极限情况为基坑影响范围边线与土洞影响范围外边线重合、土洞型岩溶地面塌陷影响范围的另一侧边线与区间隧道受影响的接近范围恰好相切, 如图 6 所示。

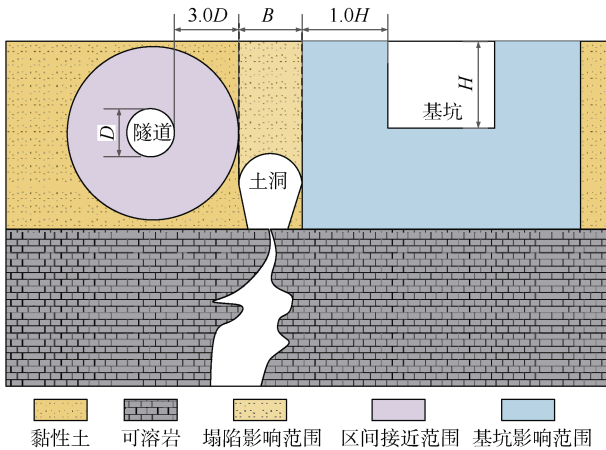


图 6 土洞型区域区间的控制保护区计算模型

Figure 6 Computational modeling of control and protect areas for metro intervals in earth cavern-type areas

此时覆盖层为黏土层的岩溶区域区间隧道控制保护区范围为:

$$L = 3D + B + H \quad (2)$$

式中, B 为土洞跨度, m 。

3.2 地下车站控制+保护区模型

车站的接近程度与施工方法有关, 通常需要考虑矿山法车站和明挖、盖挖法车站结构抗风险能力不同。由于深圳已建站点中没有位于覆盖层中的矿山法车站, 因此, 本文只考虑明挖、盖挖法车站的控制保护区范围计算。

3.2.1 沙漏模型

将外部作业基坑、溶洞、既有明挖车站结构落到统一断面上, 其极限情况为基坑影响范围边线与岩溶

通道中线重合, 沙漏型岩溶地面塌陷影响范围斜线在远处与车站受影响的接近范围相交, 如图 7 所示。

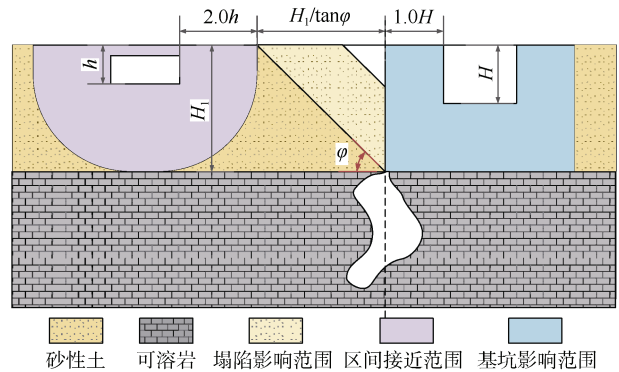


图 7 沙漏型区域车站的控制保护区计算模型

Figure 7 Computational Modeling of control and protect areas for metro stations in hourglass type areas

此时覆盖层为砂层的岩溶区域地铁车站控制保护区范围为:

$$L = 2h + \frac{H_1}{\tan \varphi} + H \quad (3)$$

式中, h 为既有明挖车站基坑开挖深度, m ; H_1 为覆盖层厚度, m 。

3.2.2 土洞模型

将外部作业基坑、土洞、既有明挖车站结构落到统一断面上, 其极限情况为基坑影响范围边线与土洞影响范围外边线重合、土洞型岩溶地面塌陷影响范围的另一侧边线与车站受影响的接近范围重合, 如图 8 所示。

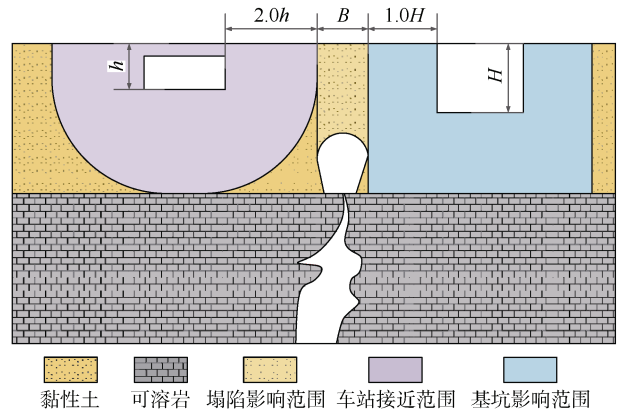


图 8 土洞型区域车站的控制保护区计算模型

Figure 8 Computational modeling of control and protect areas for metro stations in earth cavern type areas

此时覆盖层为黏土层的岩溶区域地铁车站控制保护区范围为:

$$L = 2h + B + H \quad (4)$$

4 控制保护区实例计算

选取深圳市城市轨道交通 16 号线部分区间及车站进行计算, 取外部作业基坑深度为 15 m。

4.1 黏性土覆盖层区域计算结果

根据深圳轨道交通 16 号线勘察结果, 16 号线穿越“黏性土+可溶岩”类岩溶地质结构的站点为大运站—龙城中路站和田头站—田心站之间的车站及区间, 以及田心车辆段。通过 16 号线等工程勘察揭露, 土洞高度一般小于 5 m, 且多在 3 m 以下。溶洞充填情况无明显规律, 大部分无充填, 少部分为充填溶洞, 主要充填物为粉质黏土, 少量砂砾及角砾状岩块。充填物通常

工程性质较差, 黏性土以软塑为主, 砂砾类土以松散为主。根据李勇峰^[17]在深圳大运中心场地的物探结果, 土洞、溶洞直径在 10 m 左右, 根据钻探结果, 未填充土洞基本不超过 5 m。由于岩溶分布具有很强的不规律性, 实际勘测手段难以探明全部的溶(土)洞, 根据在深圳的勘察经验取土洞跨度为 10 m, 计算结果如表 2。

4.2 砂性土覆盖层区域计算结果

根据深圳地铁 16 号线勘察结果, 16 号线穿越“砂性土+可溶岩”类岩溶地质结构的站点为龙平站—同乐村站之间的车站及区间。由于砂层中区间的控制保护区计算与隧道中心至土岩界面的距离有关, 车站的控制保护区计算与覆盖层厚度有关, 计算采用区间、车站里程范围内的最大 H_1 、 H_2 , 计算结果如表 3。

表 2 黏性土覆盖层岩溶区域地铁控制保护区计算结果

Table 2 Calculation results of control and protect areas in karst areas with clay covers

地铁结构类型	区间/站点位置	覆盖层情况	区间隧道 外径 D/m	基坑开挖 深度 h/m	土洞宽度 B/m	外部作业 基坑深度 H/m	安保区范围/m
隧道	大运北站-龙城中路站	30-2-3 强风化砂岩	6.2	-	10	15	<50
	龙南站-坪山站 东纵站-新屋站	8-5-3 含砾粉质黏土	6.2	-	10	15	<50
	田头站-田心站	8-3-3 粉质黏土	6.2	-	10	15	<50
车站	龙城西站	8-5-3 含砾粉质黏土	-	17	10	15	59
	回龙埔站	8-3-3 粉质黏土	-	16	10	15	57
	回龙埔站	8-3-3 粉质黏土	-	17	10	15	59
	龙城中路站	6-1-3 粉质黏土	-	18	10	15	61
	龙南站	8-3-3 粉质黏土	-	17	10	15	59
	龙东村站	8-3-3 粉质黏土	-	18	10	15	61
	同乐村站	8-3-3 粉质黏土	-	18	10	15	61
	东纵站	8-3-3 粉质黏土	-	17	10	15	59

表 3 砂性土覆盖层岩溶区域地铁控制保护区计算结果

Table 3 Calculation results of control and protect areas in karst areas with sandy cover layers

地铁结构类型	区间/站点位置	覆盖层情况	区间隧道 外径 D/m	基坑开挖 深度 h/m	内摩 擦角 $\varphi/^\circ$	隧道中心至土岩结合面 距离 H_2 /覆盖层厚度 H_1/m	外部作业基坑 深度 H/m	安保区 范围/m
隧道	龙平站-双龙站	5-3-2 中粗砂	6.2	-	30	10	15	72.6
	双龙站-龙南站	6-3-2 中粗砂	6.2	-	30	6	15	65.7
	龙东村站-同乐村站	6-3-2 中粗砂	6.2	-	30	13	15	77.8
车站	双龙站	5-3-2 中粗砂	-	12	18	30	15	70

4.3 结果分析

根据深圳市城市轨道交通 16 号线部分区间及车站的计算结果, 可以发现: ①覆盖层为砂层时地铁的控制保护区普遍大于覆盖层为黏土层的情况; ②覆盖层为黏土层时, 深圳的区间隧道基本可以不扩大控制保护区范围; ③覆盖层为黏土层时, 深圳地铁车站的计算结果基本为 60 m 左右; ④覆盖层为砂层时, 控制保护区范围计算结果对于砂层内摩擦角和覆盖层有效厚度等参数比较敏感。

覆盖层为砂层时地铁的控制保护区普遍大于覆盖

层为黏土层的情况与预期相符, 通常认为沙漏型塌陷的影响与危害是大于土洞型塌陷的, 更大的控制保护区范围有利于安全风险防控。覆盖层为黏土层时, 计算简单, 对参数不敏感, 只需要对已有站点区间几何参数取包络值、对勘察获得的土洞跨度和外部作业基坑深度做统计分析, 取一个深圳土洞一般跨度和基坑作业的一般深度, 即可划分一个土洞型塌陷区的控制保护区范围。

覆盖层为砂层时, 计算结果对参数较敏感。在实际工作中需要对各区段进行相对细致的计算, 在制定

标准时,根据计算结果分情况讨论,若同一线路差异不大可以取最大值作为统一标准,如差异显著则建议做区段划分,以免对周边建设开发效率造成过大的影响。

5 结论

本文对岩溶地质条件下城市轨道交通控制保护区进行研究,从规范对于城市轨道交通安全控制要求出发,阐明了外部作业基坑影响范围和既有城轨结构(地下明挖车站与区间隧道)的接近范围。通过对岩溶地面塌陷机理的研究,确定了沙漏型塌陷与土洞型塌陷的影响范围。主要研究结论如下。

1) 考虑岩溶区域控制保护区与一般情况的差别,将岩溶区域控制保护区范围拆解为3个范围的叠加:外部作业对岩溶不良地质的影响范围、岩溶地面塌陷对周边地层、结构的影响范围和既有结构本身的抗风险范围。

2) 将这3个范围落在同一断面图内,经过几何分析得到了4个岩溶区控制保护区计算模型与公式。以深圳市轨道交通16号线为例进行了控制保护区范围计算,为岩溶区域轨结构控制保护区范围的划分提供了一种可行的计算方法和依据。

3) 本文只针对城市轨道交通的主体结构进行了控制保护区计算方法研究,没有考虑城轨附属结构以及高架结构。此外,因为深圳岩溶区没有暗挖车站,因此也没有考虑矿山法车站。另,控制保护区只是地铁运营管理的第一道手段,未来需要对岩溶区域轨结构保护进行更深入细致的研究。一方面应补充对附属结构、高架结构以及矿山法隧道的控制保护区研究;另一方面应对控制保护区内外部工程作业制定更详细的控制保护要求。

参考文献

[1] 苏茂鑫,钱七虎,李术才,等.一种岩溶地质条件下的城市地铁超前预报方法[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1428-1434.
SU Maoxin, QIAN Qihu, LI Shucai, et al. A method of metro advanced geological prediction under Karst geology condition[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(7): 1428-1434.

[2] 蒋磊,钟可,戴勇,等.穿越湘江水下岩溶发育区地铁盾构选型研究与应用[J].都市轨道交通,2019,32(2):85-90.
JIANG Lei, ZHONG Ke, DAI Yong, et al. Research and application of shield selection of metro passing through Karst development area under Xiangjiang River[J]. Urban

rapid rail transit, 2019, 32(2): 85-90.

[3] 邓忠,李珊,高武振,等.覆盖型岩溶区城市地下轨道交通建设引发地质灾害风险与对策[J].城市地质,2020,15(3):261-266.
DENG Zhong, LI Shan, GAO Wuzhen, et al. Geological disaster risk caused by construction of urban underground rail transit in covered Karst area and its preventive measures[J]. Urban geology, 2020, 15(3): 261-266.

[4] 温忠义,彭卫平,张鹏,等.地铁隧道底覆盖型岩溶场地注浆加固关键技术[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):247-252.
WEN Zhongyi, PENG Weiping, ZHANG Peng, et al. key technology of grouting reinforcement in covered karst strata at the bottom of existing subway tunnel[J]. Chinese journal of underground space and engineering[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(S1): 247-252.

[5] SUN Huaiyuan, RUI Yi, LU Yanyun, et al. Construction risk probability assessment of shield tunneling projects in Karst areas based on improved two-dimensional cloud model[J]. Tunnelling and underground space technology, 2024, 154: 106086.

[6] TAO Yonghu, RAO Junying. Construction analysis of Guiyang Metro passing across Guiyang Railway Station in Karst zone[J]. Tunnelling and underground space technology, 2022, 126: 104541.

[7] PENG Yuansheng, CAO Chengyong, JI Fengling, et al. Water inrush-induced failure during deep excavation for a metro station in Karst regions in Shenzhen, China: Cause diagnosis and post-accident restoration[J]. Engineering failure analysis, 2024, 162: 108346.

[8] YANG Yubing, CHEN Caiyuan, LIU Chao, et al. Performance of a deep excavation and the influence on adjacent piles: a case history in Karst region covered by clay and sand[J]. Underground space, 2023, 8: 45-60.

[9] 容宇坤.岩溶地区隐伏型土洞对运营期城市轨道交通盾构隧道受力与变形的影响[D].广州:华南理工大学,2019.
RONG Yukun. The Effect of Hidden Soil Tunnel in Karst Area on Force and Deformation of Shield Tunnel of Urban Rail Transit in Operation Period[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[10] 邹仁高,谢建斌,李明卓,等.岩溶区不同围岩加固方案下盾构隧道列车振动荷载响应研究[J].城市轨道交通研究,2023,26(9):160-164.
ZOU Rengao, XIE Jianbin, LI Mingzhuo, et al. Vibration load response of shield tunnel trains under different surrounding rock reinforcement schemes in Karst area[J]. Urban mass transit, 2023, 26(9): 160-164.

(下转第107页)

- 665-674.
- [10] LI Shucui, PAN Dongdong, XU Zhenhao, et al. Numerical simulation of dynamic water grouting using quick-setting slurry in rock fracture: the Sequential Diffusion and Solidification (SDS) method[J]. Computers and geotechnics, 2020, 122: 103497.
- [11] ZHANG Yichi, PAN Dongdong, LI Dongyue, et al. Volume-of-fluid-based implementation for the spatiotemporal variation of viscosity in grouting process: transport time tracking approach[J]. Acta geotechnica, 2024, 19(4): 1929-1942.
- [12] 程少振, 陈铁林, 郭玮卿, 等. 土体劈裂注浆过程的数值模拟及浆脉形态影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 484-491.
CHENG Shaozhen, CHEN Tielin, GUO Weiqing, et al. Numerical simulation of fracture grouting and influencing factors for morphology of grout veins[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41(3): 484-491.
- [13] 孙子正, 李术才, 刘人太, 等. 软流塑地层注浆加固作用定量化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3385-3393.
SUN Zizheng, LI Shucui, LIU Rentai, et al. Quantitative research on grouting reinforcement of soft fluid-plastic stratum[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(S1): 3385-3393.
- [14] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 砂层压密特性及其对劈裂-压密注浆扩散过程的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 667-675.
ZHANG Lianzhen, LI Zhipeng, ZHANG Qingsong, et al. Compaction behavior of sand layer and its effect on diffusion process of fracture-compaction grouting mode[J]. Journal of China coal society, 2020, 45(2): 667-675.
- (编辑: 傅依萱)

(上接第 60 页)

- [11] 吴晟堂, 蒋小珍, 马骁, 等. 岩溶地下工程地质环境影响区范围划定初步研究-以深圳市龙岗区基坑降水为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 825-837.
WU Shengtang, JIANG Xiaozhen, MA Xiao, et al. Study on the delimitation of affected zone of geological environment for Karst underground engineering: taking Longgang district, Shenzhen City as an example[J]. Carsologica sinica, 2022, 41(5): 825-837.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for protection structures of urban rail transit: CJJ/T 202—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [13] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 101-111.
LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of Karst ground collapse in China[J]. Carsologica sinica, 2018, 37(1): 101-111.
- [14] 罗小杰, 罗程. 沙漏型岩溶地面塌陷物理模型[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 88-93.
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Physical model of ground collapse of hourglass type in Karst region[J]. Carsologica sinica, 2017, 36(1): 88-93.
- [15] 武汉市市场监督管理局. 岩溶地区勘察设计与施工技术规程: DB4201/T 632—2020[S]. 武汉, 2020.
- [16] 贾龙, 蒙彦, 管振德. 岩溶土洞演化及其数值模拟分析[J]. 中国岩溶, 2014(3): 294-298.
JIA Long, MENG Yan, GUAN Zhende. Evolution and numerical simulation of a karst soil cave[J]. Carsologica sinica, 2014(3): 294-298.
- [16] 贾龙, 蒙彦, 管振德. 岩溶土洞演化及其数值模拟分析[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 294-298.
JIA Long, MENG Yan, GUAN Zhende. Evolution and numerical simulation of a Karst soil cave[J]. Carsologica sinica, 2014, 33(3): 294-298.
- [17] 李勇峰. 深圳大运中心场地岩溶地面塌陷危险性评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
LI Yongfeng. Study on the hazard assessment of karst groundcollapse in shenzhen universiade center[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- (编辑: 傅依萱)