

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.

DOI: [10.11932/karst20220511](https://doi.org/10.11932/karst20220511)

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

吴晟堂^{1,2},蒋小珍¹,马 骁¹,汤 振¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/中国地质调查局岩溶塌陷防治重点实验室,
广西桂林 541004; 2. 中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:在大量建设城市地下轨道交通及城市更新工程的背景之下,我国城市岩溶地质灾害日趋严重。文章以深圳市3个岩溶地面塌陷事件为例,开展岩溶地下工程地质环境影响区的划定研究。首先运用高频岩溶地下水气压力监测技术对工程影响实际范围进行监测分析,然后结合工程施工参数、岩溶塌陷主要影响因素与水文地质试验参数,采用定性分析和量化计算的综合研究方法,推导出岩溶地下工程地质环境影响范围理论计算经验公式。结果表明:岩溶地下工程影响范围主要与渗透系数、工程深度成正比,与土层厚度成反比,推导的半定量理论公式适用于岩溶承压水条件下,可快速为缺乏地下水监测资料的岩溶地区地下工程安全建设及城市防灾减灾工作提供依据。

关键词:岩溶地下工程;岩溶地下水气压力监测;工程影响区;抽水试验;经验公式

中图分类号:P642 文献标识码:A

文章编号:1001—4810(2022)05—0825—13 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

深圳作为全国城市建设先行示范区,总结其岩溶地下空间开发的经验教训具有重大意义。深圳市岩溶区主要分布在龙岗区、坪山区和大鹏新区。自2018年以来,新建14号、16号、深大城际和深惠城际地铁线均途经这三大岩溶区,同时岩溶区分布着大量高层建筑的深基坑,据2020年5月统计,仅在龙岗全区施工的高层建筑深基坑工程就多达74处。岩溶区地下空间的高度开发导致岩溶地质灾害频发,严重威胁人民生命财产安全,阻碍经济发展建设。在全国城市岩溶地质灾害形势日加严峻的背景之下^[1-2],工程建设规范中的工程影响区相关规定受到极大的挑战。

地下工程影响区是指施工过程中,因工地周边岩土体被扰动、破坏而可能产生灾害的区域范围。因此,对地下工程影响区的划定具有重要的意义。主要包括:指导施工监测工作,提前规避工程隐患,反馈施工设计方案不足;明确划分相关责任范围,督促相关建设单位履行自身职责,确保周边地区安全等。国内外有关该领域研究主要是应用监测数据分析和数值模拟计算方法获得,如张建全等^[3]采用监测数据分析、数值计算方法,认为明挖工程横向影响范围划分以距基坑边线0.7、1倍基坑深度的距离为分界较为合理;崔庆龙等^[4]对岩溶区三倍基坑深度平面范围内的连续墙和地面沉降变化监测数据进行分析,得出地表沉降与地下连续墙位移呈匀形分布;

基金项目:国家自然科学基金(42077273);中国地质调查局项目(DD20190266)

第一作者简介:吴晟堂(1995—),男,硕士,主要从事岩溶地质灾害防治研究。E-mail: 1047911305@qq.com。

通信作者:蒋小珍(1970—),女,博士,研究员,博士研究生导师,主要从事岩溶地质灾害防治研究。E-mail: 511036641@qq.com。

收稿日期:2022—01—10

厉立兵等^[5]提出基于实测总势能极小原理,求解基坑降水影响半径的有限元计算方法,得出适用于一般均质岩土区的影响半径和涌水量预测方法;工程监测规范^[6-7]把地下工程的影响区分为主要影响区、次要影响区及可能影响区,《城市轨道交通监测技术规范》GB 50911 的 3.2.5 条规定:施工监测范围应根据多因素综合确定,包括主要及次要影响区,主要影响区在三倍基坑深度的平面范围是监测的重点区域。美国也有地下工程影响区著名研究案例,20世纪 80 年代中期,马里兰州凹陷灰岩采石场大规模扩张,导致周边岩溶塌陷灾害频发,公共安全受到严重影响,纠纷不断。1991 年马里兰州议会通过了建立降水影响区(ZOI)^[8]的立法,新规明确提出:必须要由专业地质人员依据水文地质条件划定采石场安全责任范围。立法后多个采石场设立了降水影响区,范围半径通常在数百米^[9-10]。影响区建立后矿业公司多次上诉,要求废除该法规,但都以失败告终^[11-12]。社会法律规范应与地下空间开发工程的发展相适应^[13],不断提高标准以降低安全风险。岩溶区地下工程引发塌陷的影响范围远大于规范要求监测范围的案例比比皆是^[14-16],目前国内岩溶地下工程普遍按照非岩溶区地下工程深度的三倍平面范围进行监测,导致一些地区重蹈美国上世纪 80 年代岩溶区采矿的旧辙,施工方与周围业主纠纷不断,如广州金沙洲武广高铁隧道诱发岩溶塌陷,致使隧道两旁 100~400 m 范围内分布着 8 个塌陷坑,直接损失 3 亿元^[17]。

本文通过深圳龙岗三个岩溶塌陷灾害案例,分析岩溶区施工工程影响范围及相关影响因素,结合水文地质试验参数与工程影响范围的关系,建立岩溶发育区工程影响范围计算方法和评判体系,旨在为城市岩溶地质灾害防灾减灾工作的顺利开展提供可靠依据。

1 工程实例背景

1.1 区域水文地质背景

研究区位于深圳市龙岗区,其覆盖型岩溶区是我国该类型岩溶的典型代表^[18-19],区域内雨量丰沛,地貌形态为冲洪积平原,地形起伏小。工程实例选取 2020 年在建的龙岗区 16 号地铁线数码城站基坑、龙平站基坑和某更新工程 5#地块,三个工程场地均位于覆盖型岩溶区,由于基坑施工引发了多处岩溶

塌陷(图 1)。

区域第四系主要由人工填土、粉质黏土、含泥炭质粉质黏土、粉细砂和含砾粉质黏土等组成,下伏地层为石炭系下统大塘阶石磴子组(C₁d)灰岩、大理岩,测水组(C₁c)砂岩,局部分布燕山期花岗岩体,地层走向为 NE, 倾向 SE。龙岗区位于紫金—惠阳凹褶断束中区域性的龙岗复式向斜北西翼,为 NE 向五华—深圳大断裂切割,NE 向的莲花山断裂带是本区域内的主导构造,NW 向断裂发育程度次于 NE 向,EW 向断裂不发育。

地下水主要为第四系孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水。第四系孔隙水主要赋存于砂卵石层,由大气降雨、下部岩溶水越流补给、地表水补给,受地形控制,总体流向为北东向,补给岩溶水、侧向径流和蒸发是孔隙水的主要排泄途径;基岩裂隙水赋存于花岗岩、碎屑岩裂隙中,水量和岩石风化程度、裂隙发育程度有关,水量分布不均,接受降水入渗、水库渗漏补给,大部分汇入地表水库及河流中,小部分侧向径流补给岩溶水;岩溶水主要赋存于石磴子组碳酸盐岩裂隙和溶洞中,具承压性,粉质黏土层大多直接覆盖于碳酸盐岩之上,局部为砂卵石孔隙含水层,其中河道阶地多为富含地下水的砂卵石含水层,是岩溶水的主要直接补给源,岩溶水径流方向为北东向,以泉的方式直接在地表排泄(图 2)。

1.2 场地工程地质条件

受 NE 及 NW 向构造的控制,场地溶槽溶洞强烈发育,基岩面起伏大,最大填充型溶洞直径 18 m,最深溶槽发育深度达地面以下 71.1 m。

数码城站场地周边 1 876 个钻孔显示该区域土层厚度多为 6~23 m,最薄处 0.2 m,最深处 71.1 m,土层平均厚度 12.97 m,岩溶主要发育深度在地面以下 9~24 m。其中有 1433 个入岩超 5 m 的钻孔,平均孔深 32.73 m,钻孔见洞率 42.9%,平均线岩溶率高达 24.8%;根据钻探及基坑开挖揭露:数码城站北西侧约 350 m 发育断裂 F1251,断裂特征:走向 NE 向 64°,倾向 SE,倾角 60°,宽 30~50 m,由黑色、糜泥化的炭质砂、板岩组成,为隔水构造,上下盘皆为岩溶含水层,分属两个岩溶水子系统。

5#地块 900 m 范围内 1 452 个钻孔显示该区域土层厚度多为 7~25 m,最薄处 2.1 m,最深处 60.5 m,土层平均厚度 16.91 m,岩溶主要发育深度在地面以

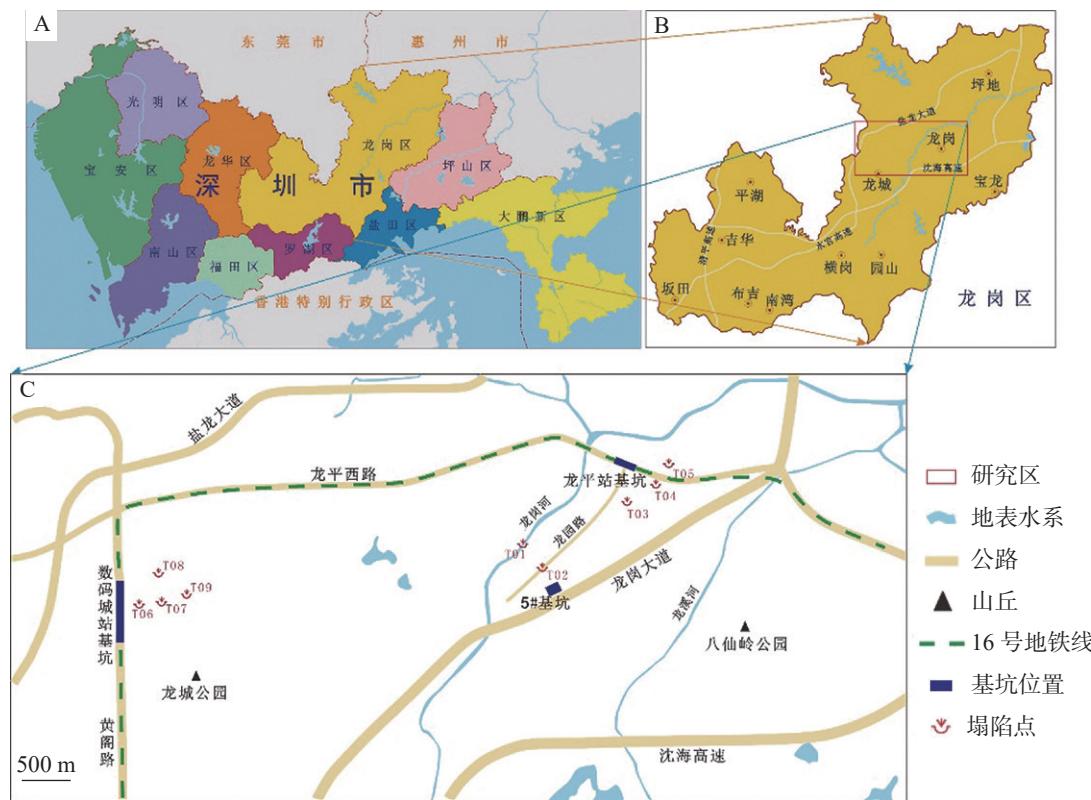


图 1 研究区地理位置及灾害分布图

Fig. 1 Geographical location and disaster distribution of the study area

下 10~25 m。其中有 989 个入岩超 5 m 的钻孔, 平均孔深 26.97 m, 见洞率 29.4%, 平均线岩溶率高达 26.8%; 清林径断裂束之将军帽断裂 F3531 通过 5# 地块, 断裂特征: 走向 NW 向 320°, 发育于石炭系下统, 构造岩为褐铁矿化碎裂岩、硅化岩, 岩体胶结程度好, 岩性致密, 形成阻水构造, 上下盘皆为岩溶含水层, 分属两个岩溶水水系。

龙平站场地 900 m 范围内 1367 个钻孔显示该区域土层厚度多为 7~24 m, 最薄处 1.9 m, 最深处 40.2 m, 土层平均厚度 13.31 m, 岩溶主要发育深度在地面以下 9~22 m。其中有 958 个入岩超 5 m 的钻孔, 平均孔深 33.25 m, 见洞率 39.2%, 平均线岩溶率高达 21.4%; 龙城断裂组 F1255 位于龙平站北西侧约 130 m, 走向 NE 向 49°, 性质与将军帽断裂 F3531 相似, 为阻水构造。

2 工程实际影响范围的监测

2.1 监测方法

研究采用较为成熟的高频高精度岩溶地下水气压力监测方法^[20-21], 监测点间距 50~200 m。可分为

前期 2 min 频率的半自动化监测和后期 5 min 频率的全自动化监测。结合地层岩性分布及构造等条件, 实时分析岩溶区域地下水动态变化规律, 确定工程影响区的范围。

2.2 地下工程影响区的范围确定

通过基坑出水点调查及水文监测孔地下水位监测数据(表 1), 绘制出各基坑周边的岩溶水等测压水位线图。地下水水流场表明各场地岩溶含水介质具有明显的各向异性, 主要受岩溶及构造控制。

数码城站基坑开挖深度 22.3 m, 由南向北分段施工, 周边形成以基坑出水点为中心的降落漏斗。岩溶地下水在基坑北西侧受 NE 向阻水断裂带 F1251 和天健现代城(原为山丘)分水岭阻隔, 南东向受龙城公园阻隔, 且为埋藏型岩溶区。场地流场受北东向构造及基坑抽水的影响, 降落漏斗整体呈长轴为北东向的椭圆形(图 3)。

5#地块使用了冲孔桩工艺, 工程深度 19.84 m, 该工艺在岩溶区十分敏感, 由于桩基施工时水气压力的冲击, 5#地块与龙岗河中央塌陷冒水点 T01 之间的岩溶通道贯通(大功率充电法验证结果), 形成以 T01 为中心的降落漏斗。南西侧受北西向阻水断

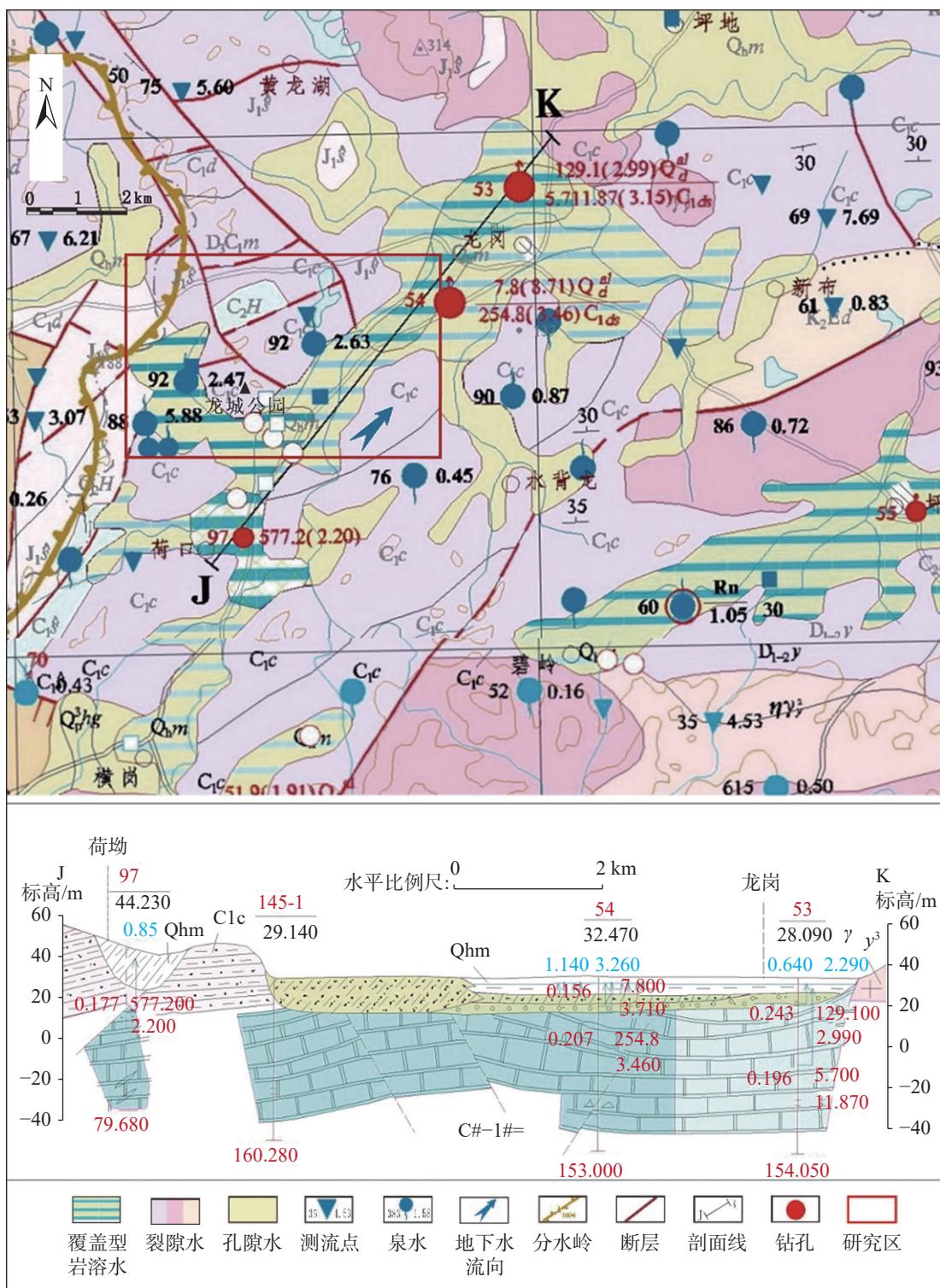


图 2 龙岗—荷坳盆地水文地质略图(资料来源惠阳幅 1:20 万水文地质图)

Fig. 2 Hydrogeological sketch map of Longgang-Heao basin (Data source from Huiyang 1:200,000 hydrogeological scheme)

裂 F3531 阻隔, 岩溶发育具有北西条带状特征, 漏斗整体呈长轴为北西向的椭圆形(图 4)。龙平站基坑开挖深度 27 m, 周边形成以基坑出水点为中心的降落漏斗, 北西侧受 NE 向阻水断裂 F1255 阻隔, 水位控制点不足(图 5)。

各漏斗中心及范围会随着地下工程施工进度发生转移及变化, 工程影响范围主要分布在各自的地下水降落漏斗范围内, 5#更新工程情况特殊, 降落漏斗内只包含部分工程影响范围。结合施工时各监测点的岩溶地下水气的扰动变化情况判断, 数码城站

表 1 工程参数及岩溶发育指标一览表

Table 1 Engineering parameters and karst development indicators

基坑工程	基坑长度/m	基坑宽度/m	地面原标高/m	工程深度/m	土层厚度/m	岩溶发育深度/m	钻孔/个	见洞率/%	线岩溶率/%
数码城站	512	16~56	43.0	22.3	6~23	9~24	1876	42.9	24.8
5#地更新工程	200	150	35.0	19.8	7~25	10~25	1452	29.4	26.8
龙平站	191	28	35.8	27.0	7~24	9~22	1367	39.2	21.4

注: 依《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011 表 6.6.2 划分标准, 判定研究区岩溶强发育。

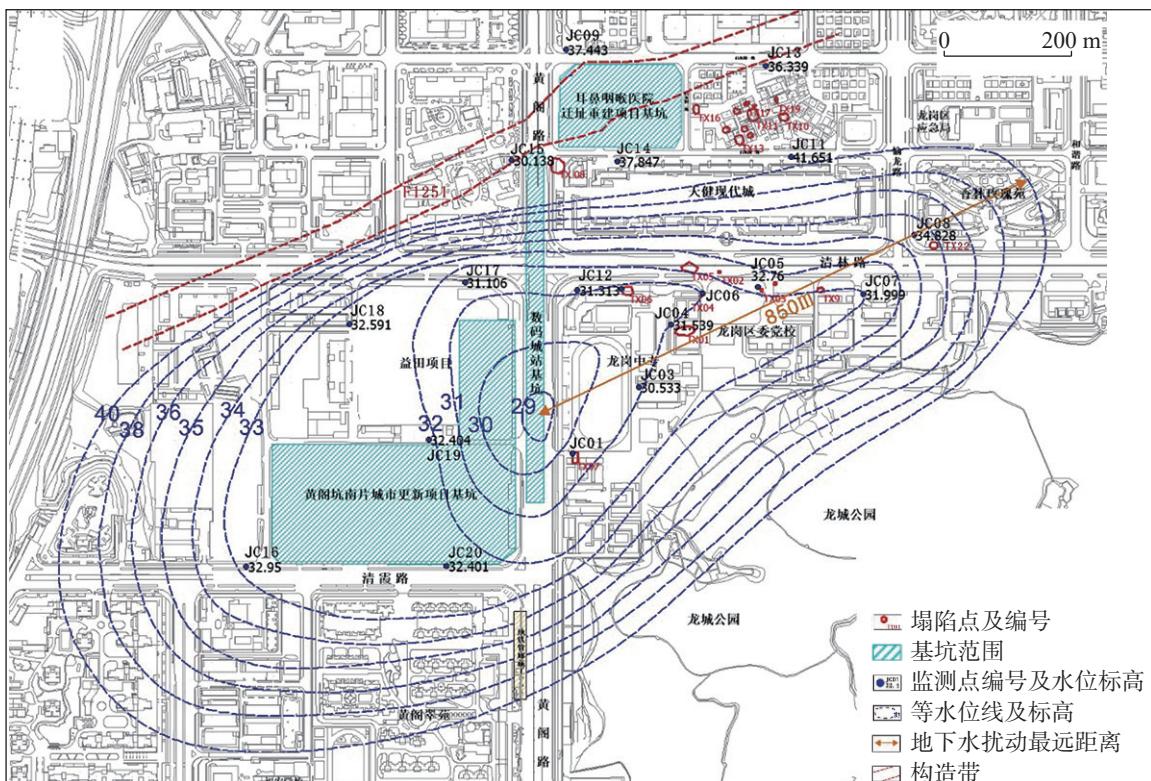


图 3 数码城站岩溶水等测压水位线图(2020.10.24)

Fig. 3 Diagram of isometric manometric karst water level at Digital City Station (2020.10.24)

片区最大可观测影响距离超过北东侧 JC08 监测孔, 达到 850 m; 5#基坑北侧外围 SW03 和东侧外围 SW06 未受到 5#基坑冲孔桩施工的影响, 最大影响距离约为相距 560 m 的 JCA01 监测点; SW06 的监测数据表明该点受龙平站基坑涌水影响, SW103 和 SW05 未受影响, 龙平站基坑最大影响距离为 820 m。表 2 为基坑监测信息及工程影响范围统计。

3 理论影响范围经验公式推导

3.1 推导原理

水文监测网虽能监测到工程实际影响范围, 但多数地区缺乏水文监测孔, 且水文监测孔数量、成孔

技术及监测方案要求较高, 监测周期要达到 3 个月以上。岩土工程勘察规范对地下水动态的监测重视程度不足, 但会开展部分抽水试验工作, 因此本文试图通过研究抽水试验的相关参数, 寻找岩溶区工程影响范围的计算方法。

抽水影响半径最早由 Thiem 为解决 Dupuit 公式应用问题而提出来^[22], 原始定义为抽水井与观察不到水位降深的边界的水平距离。Thiem 模型理论认为无限含水层抽水井保持抽水量不变, 较长时间后区域地下水水流会形成似稳定流场, R 以外的补给区水头变化小可忽略不计。目前相关学者对影响半径的理解存在很大差异^[23~24], 有人认为它是含水层本身具有的常量参数, 也有人认为它会随抽水降深增大

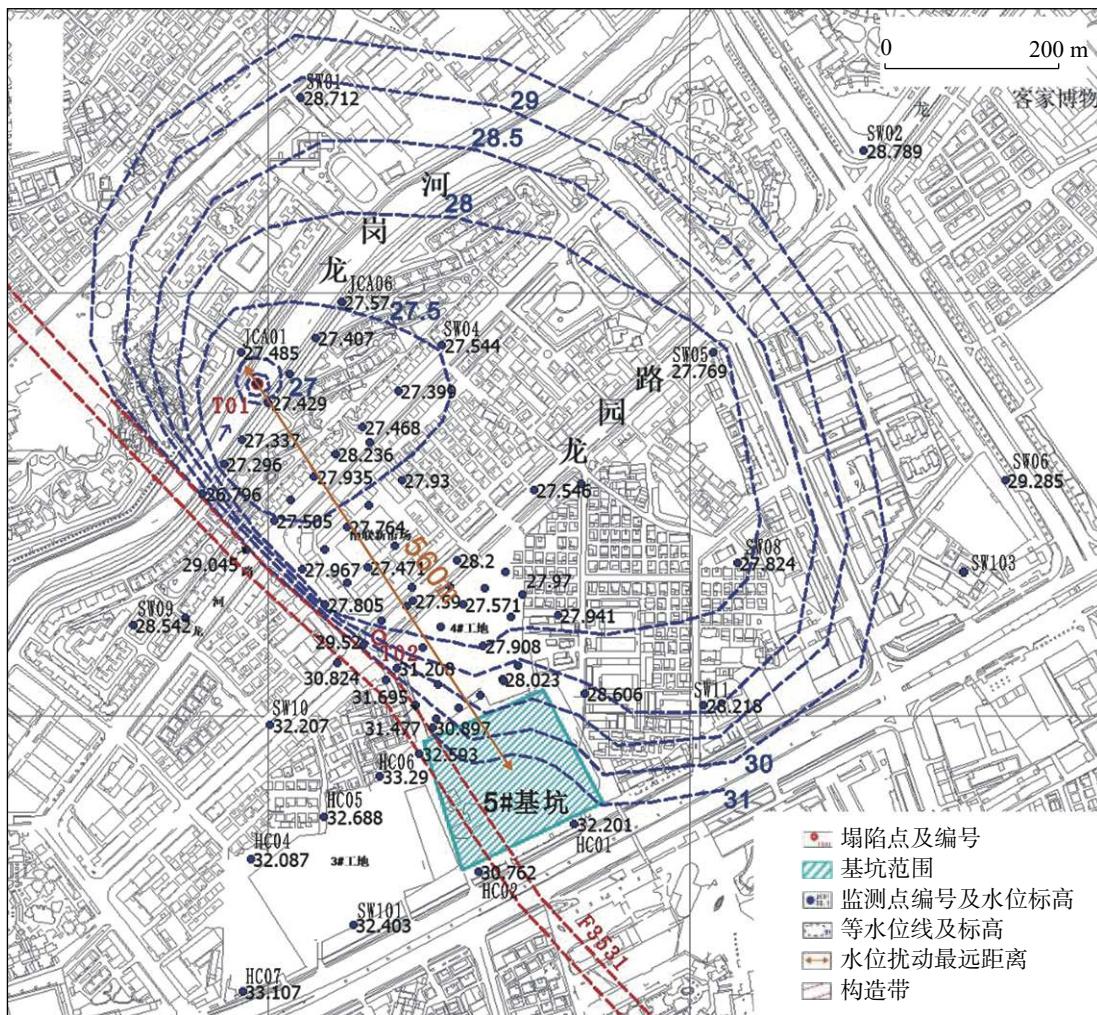


图 4 5#基坑岩溶水等测压水位线图(2020.04.27)

Fig. 4 Diagram of isometric manometric karst water level in foundation pit 5# (2020.04.27)

表 2 工地监测信息统计表

Table 2 Statistical table of site monitoring information

工程 场地	监测点 数量/个	监测点 平均间距/m	监测面积/ km ²	监测 频率/min	工程实际 影响半径/m	地下水降落漏斗影响范围 形成日期/年.月.日
数码城站基坑	19	200	0.52	2~5	850	2020.10.24
5#工地	74	100	0.85	2~5	560	2020.04.27
龙平站基坑	8	180	0.31	2~5	820	2021.02.02

而增大,不应视为常参。而在岩土工程应用上,地质工作者通常将影响半径 R 当作水文地质参数,表征的是含水系统对抽水系统的补给能力,故概念虽有争议,但并不妨碍其实用性。与非零降深降落漏斗不同,工程上影响半径可理解为降落漏斗中心可观测地下水降深区域的半径,工程影响区则可理解为地下水降落漏斗范围内岩土体可能产生渗透变形破坏的范围。因此利用抽水试验计算公式推导影响范围经验公式具有可靠性,可借鉴承压水抽水孔吉哈

尔影响半径经验公式(1)^[25]。

$$R = 10S \sqrt{K} \quad (1)$$

式中: R 为影响半径(m); S 为水位降深(m); K 为渗透系数($m \cdot d^{-1}$)。

3.2 影响因素及公式建立

从灾害时间上看,岩溶地下工程开发是一个长期的过程,按照现有施工止水措施,只要工程揭露基岩面,岩溶地下水就会被扰动,从而新生土洞或

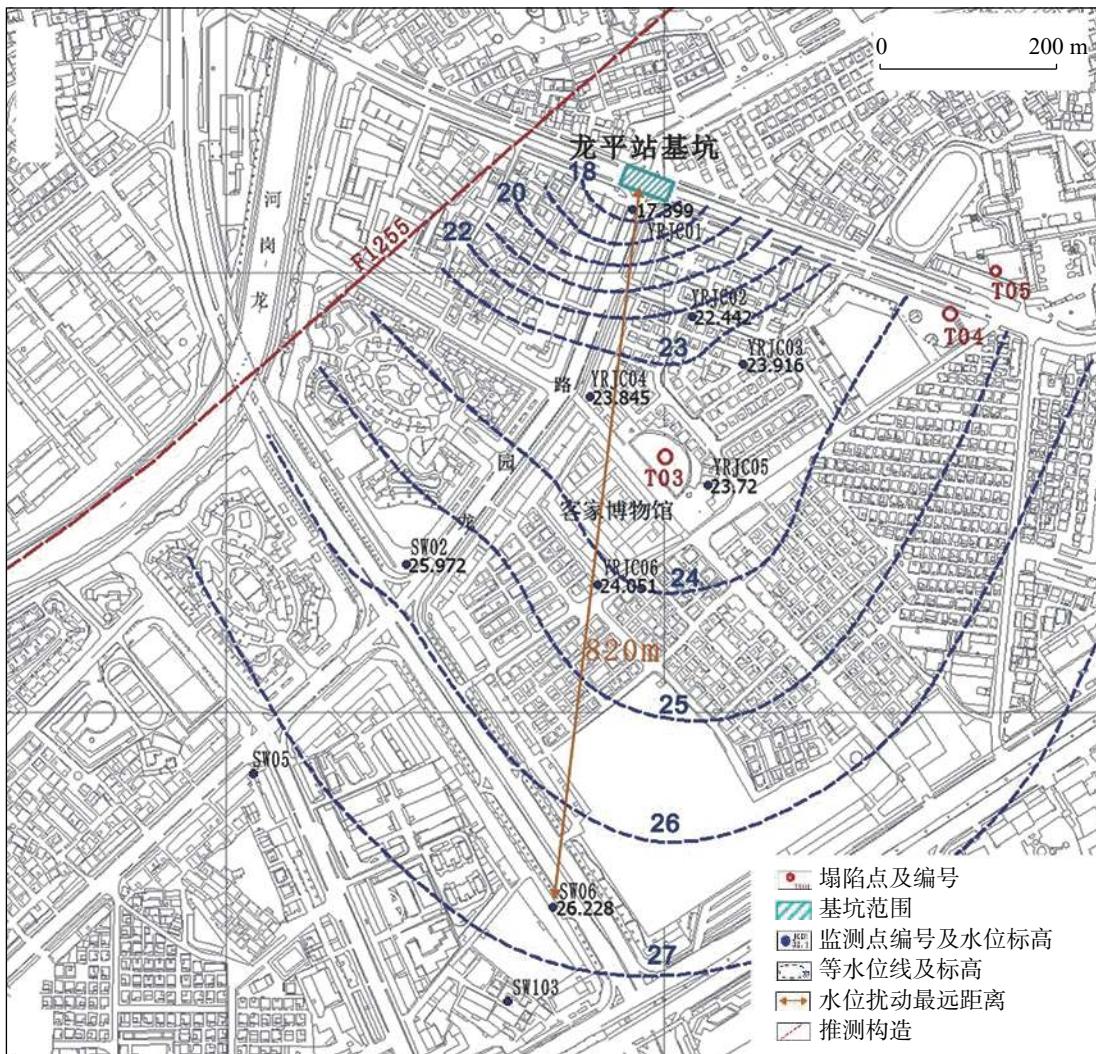


图 5 龙平站岩溶水等测压水位线图(2021.02.02)

Fig. 5 Diagram of isometric manometric karst water level at Longping Station (2021.02.02)

扩展原有土洞, 最终诱发塌陷。从空间分布看, 三个研究案例的岩溶塌陷点距离基坑 50~700 m, 其中又以地下工程所在位置的地下水中下游区域形成的塌陷居多, 上游区域在地下水快速漏失时能快速得到补给, 相比地下水快速下降的中下游区岩溶塌陷也会相对较少。岩溶塌陷的形成路径可以归纳为基坑降水—水(气)压力突变传导—覆盖层破坏, 即在岩溶强烈发育的内因之下, 基坑开挖降水导致地下水的水动力条件发生改变, 水动力条件的变化使岩溶地下水(气)产生扰动, 岩溶水扰动产生的作用力通过溶岩管道(裂隙)传播作用于覆盖层底板, 使得覆盖层土体逐渐崩解流失, 直至抗塌力不足顶板失稳。对应塌陷的形成路径, 在公式(1)的基础上, 量化地下工程特征、岩溶水文地质特征以及覆盖层特征三个主要因素的影响, 推导出工程影响范

围计算经验公式。

3.2.1 地下工程特征

开挖深度是规范评价地下施工影响范围的常用重要指标, 易于应用推广。岩溶区基坑开挖至岩面后对承压岩溶水的扰动程度会剧增, 入岩越深, 周边原地下水位降幅越大, 岩溶区影响范围越广, 因此工程深度和基坑原始水位的差值与工程影响范围直接相关。以数码城站基坑工程为例, 地表以下 10 m 埋深内发育的岩溶多以溶沟为主, 岩溶最发育层位在 20 m 埋深上下(图 6)。基坑开挖深度小于 10 m 而未全面深入基岩时, 施工对地下岩溶水扰动较小, 工程诱发岩溶灾害风险低。后续开挖入岩越深, 地下水降深扰动越大, 风险性也逐渐提高。当开挖深度达到岩溶最发育层 20 m 时, 数码城站周边存在非常

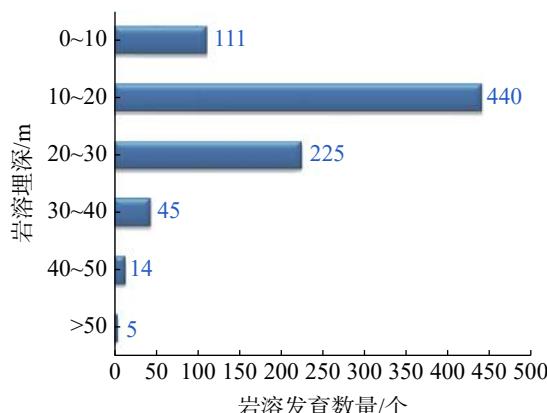


图 6 数码城站片区垂直岩溶发育分布图

Fig. 6 Vertical karst development and distribution map of Digital City Station

大的灾害风险，极易塌陷。

3.2.2 岩溶含水层的渗透系数

同一个岩溶水系统区域内，区域渗透系数越大，表明岩溶管道裂隙连通性越好，基坑施工对地下水的扰动传播越远。[图 7](#) 为岩溶管道裂隙涌水诱发岩

溶塌陷灾害的示意图，基坑侧壁的支护咬合桩可隔断侧方浅层岩溶水的流入，但抽水试验证明深部岩溶水与浅层岩溶水具有密切水力联系，基坑底板的抽排水、爆破等施工仍会造成大范围的区域地下水位扰动下降。底板涌水问题是目前岩溶区基坑开挖引起地面塌陷（沉陷）的主要原因，根据现场基坑调查，数码城站基坑底板涌水量最高达 $50 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3.2.3 覆盖层特征

岩溶塌陷主要分布在覆盖型岩溶区，覆盖层厚度决定着塌陷发生至地面的难易程度，覆盖层厚度薄的区域比厚的区域易形成岩溶塌陷。国外学者对某区覆盖层专业研究后发现，该区覆盖层临界安全厚度为 13.6 m ^[26]，国内塌陷案例及课本理论则表明塌陷覆盖层厚度危险界限一般为 15 m ^[27]。龙岗区多个塌陷坑覆盖层厚度统计结果[表 3](#)说明：覆盖层厚度大于 30 m 区域未有岩溶塌陷产生， $15\sim30 \text{ m}$ 厚度属中低风险，小于 15 m 区域则应是重点关注的高风险区。

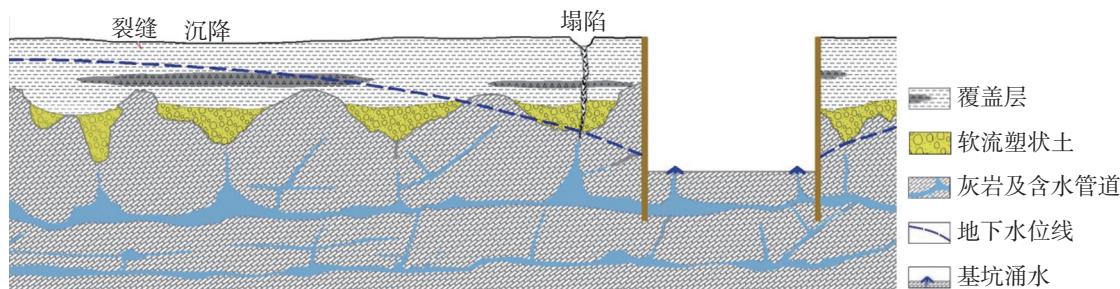


图 7 岩溶区深基坑诱发灾害示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the disaster induced by deep foundation pit in the karst area

表 3 龙岗区塌陷点覆盖层厚度统计表

Table 3 Statistical table of overburden thickness on collapse point in Longgang area

塌陷编号	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09
覆盖层厚度/m	6	20.6	14	8	9.3	11.6	14.4	9.3	14.8

将整个区域岩溶含水层简化为各向同性多孔介质，介质的渗透系数与岩溶管道（裂隙）发育带的渗透系数一致。新建经验公式可用基坑深度与初始基坑地下水埋深之差($S'-h$)类比抽水水位降深 S ； K 为多次抽水试验渗透系数计算结果中的较大值，一般工程应用中，渗透系数取场地六次以上抽水试验计算结果中的三次较大值的平均值，若六次试验结果得出的渗透系数均过小，工程影响距离计算结果小于三倍基坑深度，则工程影响范围按三倍基坑深度

算；以 15 m 覆盖层厚度为危险界限构建土层影响系数 $15/d$ ， d 为剔除局部深溶槽后的区域覆盖层平均厚度；设立工程经验系数 α ， α 可通过多个工程实例反演后得到。经验公式的适用条件为：具有粘性土直接覆盖的承压岩溶含水层，且工程深度大于基岩面深度的岩溶区地下工程。

$$R' = \alpha(S' - h) \frac{15}{d} \sqrt{K} \quad (2)$$

式中： R' 为工程影响范围半径(m)； α 为经验系数； S'

表 4 场地抽水试验成果表
Table 4 Results of site pumping tests

试验场地	钻孔编号	试验段埋深/m	静止水位埋深(h)/m	水位降深(s)/m	涌水量(Q)/m ³ ·d ⁻¹	影响半径(R)/m	平均渗透系数K/m·d ⁻¹
数码城站	SMSW01	8.3~24.8	1.95	6.0	392.1	133.2	
				4.0	336.5	98.8	6.63
				2.0	262.4	59.5	
数码城站	SMSW02	4.0~28.0	1.90	6.0	442.5	502.3	
				4.0	302.2	330.9	67.87
				2.0	156.8	161.3	
数码城站	SMSW03	12.0~14.2	2.20	9.0	38.7	159.6	
				6.0	23.9	99.3	2.70
				3.0	10.8	44.5	
龙平站	LPSW01	4.0~29.5	4.51	6.6	527.2	167.8	
				5.6	450.3	140.8	6.33
				4.7	375.6	115.9	
龙平站	LPSW02	4.0~10.8	4.40	3.0	373.0	77.3	
				2.0	262.4	48.6	23.14
				1.0	145.9	22.9	
龙平站	LPSW03	15.0~20.0	4.00	10.2	5.3	32.6	
				6.8	3.3	20.4	0.09
				3.4	1.5	8.8	
龙平站	LPSW04	11.0~15.6	3.40	7.5	130.3	200.9	
				5.0	98.0	138.9	7.75
				2.5	57.9	72.2	
龙平站	LPSW05	13.6~17.0	3.10	10.5	590.9	510.4	
				7.0	496.5	375.4	28.30
				3.5	302.2	199.6	
5#地块	SW102	17.5~99.5	3.7.0	2.4	151.9	144.3	37.40

为工程深度(m); h 为初始基坑水位埋深(m); d 为区域覆盖层平均厚度(m); K 为岩溶发育带渗透系数($m \cdot d^{-1}$)。

3.3 经验系数反演及理论范围划定

表 4 为数码城站、龙平站和 5#地块岩溶含水层抽水试验数据成果。数码城站和龙平站渗透系数结果均采用单孔抽水试验公式计算, 5#地块通过观测孔抽水试验公式计算。

根据钻探资料, 数码城站 SMSW01 试验段发育四层串珠状溶洞, 溶洞总高 3.6 m, 渗透系数仅 $6.63 m \cdot d^{-1}$, 而 SMSW02 只一层 1.5 m 高的溶洞, 渗透系数却是 SMSW01 的十倍以上, 达 $67.87 m \cdot d^{-1}$, 同一含水层的

不同抽水孔得到的渗透系数及影响半径相差很大, 说明岩溶管道裂隙发育分布不均, 连通性及溶洞充填差异较大。剔除 SMSW03 取 SMSW01 和 SMSW02 渗透系数的平均值代表数码站岩溶水系统的渗透系数, 平均渗透系数取 $37.25 m \cdot d^{-1}$; 同理龙平站取 LPSW02 和 LPSW05 的平均渗透系数 $25.72 m \cdot d^{-1}$; 5#基坑工程则为 $37.40 m \cdot d^{-1}$ 。以上三个数据可作为各自场地最大工程影响范围划定依据。

表 5 为工程初始参数经过公式(2)反演后得出的反演结果, 经验系数 α 经三次反演后得出平均值为 5.9。以 α 等于 5.9 作为经验系数计算得出的理论公式影响范围较为接近工程实际监测影响范围, 误

表 5 经验系数 α 反演结果
Table 5 Inversion results of empirical coefficient α

区域	工程深度 H/m	初始水位 埋深 h/m	土层平均厚度 d/m	区域渗透系数 K/m·d ⁻¹	实际影响半径 R/m	理论影响半径 R'/m	范围误差/%	经验系数 (α)	平均经验系数 ($\bar{\alpha}$)
数码城站	22.27	1.9	12.97	37.25	850	848	0.2	5.9	
龙平站	27.0	3.1	13.31	25.72	820	806	1.7	6.0	5.9
5#地块	19.84	2.38	16.91	37.4	550	559	1.6	5.8	

差不超过 2%，计算结果较为可靠实用，易于在工程应用中推广。

经验系数 0.59 代入公式(2)后得出经验公式(3)，该公式计算的结果基本能推断工程的影响距离，结合地质构造、地形分水岭等即可预测工程影响范围，

精度可满足工程实际应用需求。

$$R' = 5.9(S' - h) \frac{15}{d} \sqrt{K} \quad (3)$$

经公式(3)计算及地质构造等条件得出三个工程实例的影响范围简化示意图如图 8 黄色区域。

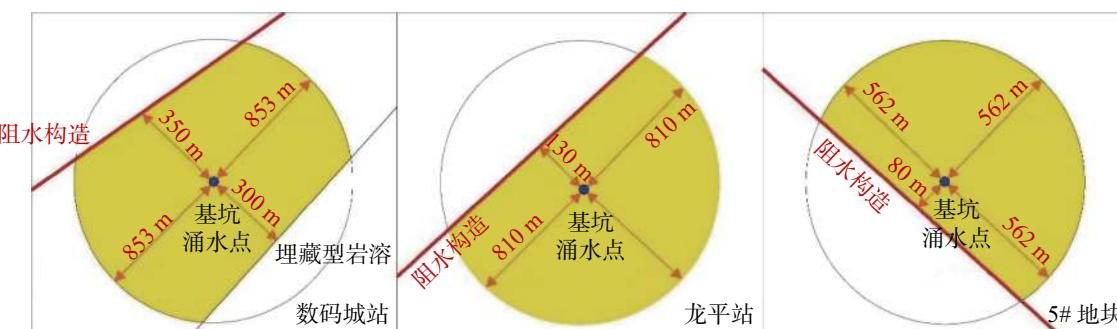


图 8 工程影响范围划定简化示意图

Fig. 8 Simplified schematic diagram of delimitation of the affected zone for engineering

4 结 论

岩溶发育区地下工程易诱发岩溶塌陷灾害，相关岩土工程勘察、监测规范面临极大的挑战，为了支撑岩溶区工程安全建设，有待提高标准，也将有利于岩溶区地下工程责任主体及责任区的明确划分。本文初步采用定量计算为主，定性分析为辅的方式开展岩溶工程影响区划定初步研究，得到以下结论：

(1) 岩溶区溶洞、裂隙发育，为有效预防岩溶塌陷灾害，工程施工时对岩溶地下水的扰动监测是重中之重，采取合理正确的岩溶地下水气监测方案能有效判断工程实际影响范围并采取相应的防控措施。因此地下水的监测范围应考虑超出用地批准红线；

(2) 根据水文地质试验参数推导的岩溶地下工程影响范围计算公式表明：地下工程影响范围主要与渗透系数、工程深度成正比，与土层厚度成反比。

反演得出的相关经验系数 α 约为 5.9，公式应用于岩溶区地下工程的影响半径计算具有可靠性，但经验系数 α 需要更多的工程数据加以推敲验证；

(3) 工程影响范围计算公式适用于第四系与岩溶含水层之间有较厚隔水层，基坑深度大于岩面深度且为承压岩溶水的地下工程。最终的范围划定需建立于专业的岩溶地质调查基础之上，并对地质构造等形成的范围边界予以修正。

致谢：美国佛罗里达州立大学水文地质教授 Ye Ming、美国 ZEO Environmental 地质咨询公司首席水文地质学家 Zhou Wangfang，从 Thiem 公式及地下水影响半径使用条件等方面给本文提出了指导性的建议，在此谨向他们致以衷心的感谢！

参考文献

- [1] Lei M, Jiang X, Gao Y. Current Status and Strategic Planning of Sinkhole Collapses in China [J]. Engineering Geology for Society and Territory, 2015, 5: 529-533.
- [2] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析 [J]. 中国岩溶,

- 2019, 38(3): 411-417.
- MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 411-417.
- [3] 张建全, 闫宇蕾, 宋伟超, 王彪, 张克利. 地下工程施工工程影响分区综合研究与应用 [J]. 施工技术, 2020, 49(7): 65-67, 108.
- ZHANG Jianquan, YAN Yulei, SONG WEichao, WANG Biao, ZHANG Keli. Comprehensive study and application of underground engineering construction influence zoning [J]. Construction Technology, 2020, 49(7): 65-67, 108.
- [4] 崔庆龙, 沈水龙, 吴怀娜, 许烨霜. 广州岩溶地区深基坑开挖对周围环境影响的研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 553-557. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.096.
- CUI Qinglong, SHEN Shuilong, WU Huaina, XU Yeshuang. Field investigation of deep excavation of metro station on surrounding ground in karst region of guangzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 553-557. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.096.
- [5] 厉立兵, 侯兴民, 李远东. 一种基坑降水影响半径的有限元计算方法 [J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 574-580.
- LI Libing, HOU Xingmin, LI Yuandong. A finite element method for calculating the influence radius of foundation pit dewatering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 574-580.
- [6] 建筑基坑工程监测技术规范 [S]. 中华人民共和国国家标准. 2009: 94p: A4.
- Technical code for monitoring of building excavation engineering [S]. National standards of the People's Republic of China. 2009: 94p: A4.
- [7] 城市轨道交通工程监测技术规范 [S]. 中华人民共和国国家标准. 2014: 0p: A4.
- Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering [S]. National standards of the People's Republic of China. 2014: 0p: A4.
- [8] Gary M K. Maryland's zone of dewatering influence law for limestone quarries [C]. Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst: 1999: 273-277.
- [9] Maryland.gov. Press Release. [EB/OL]. (1998-03-30). <https://mde.maryland.gov/programs/Pressroom/Pages/399.aspx>.
- [10] Maryland.gov. Press Release. [EB/OL]. (1998-04-29). <https://mde.maryland.gov/programs/Pressroom/Pages/393.aspx>.
- [11] Aston R L. Maryland limestone producers protest discrimination [J]. Engineering and Mining Journal, 1998, 199(4): 32RR.
- [12] United States Court of Appeals, Fourth Circuit. Laurel Sand & Gravel, Inc. v. Wilson. [EB/OL]. (2008-03-05) [2022-03-25]. <https://www.courtlistener.com/opinion/1025180/laurel-sand-gravel-inc-v-wilson/>.
- [13] Dr S F. The Practical Impacts of Karst Regulations on the Communities that Implement Them - a Pair of Case Studies [J]. Springer Netherlands, 2009.
- [14] Brezinski D K. Geologic and anthropogenic factors influencing karst development in the Frederick region of Maryland [J]. *Environmental Geosciences*, 2007, 14(1): 31-48.
- [15] Lv Yuxiang, Jiang Yongjun, Hu ei, Mao Yang. A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in karst areas: Current status, challenges, and perspectives [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124891.
- [16] 刘鹏瑞, 刘长宪, 姜超, 王芳, 陈钰, 贾龙. 武汉市工程施工引发岩溶塌陷机理分析 [J]. *中国岩溶*, 2017, 36(6): 830-835.
- LIU Pengrui, LIU Changxian, JIANG Chao, WANG Fang, CHEN Yu, JIA Long. Mechanism of karst collapse caused by engineering construction in Wuhan City [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 830-835.
- [17] 黄健民, 吕镁娜, 郭宇, 陈小月. 广州金沙洲岩溶地面塌陷地质灾害成因分析 [J]. 中国岩溶, 2013, 32(2): 167-174.
- HUANG Jianmin, LV Meina, GUO Yu, CHEN Xiaoyue. Research on the reason for geologic disaster by karst surface collapse at Jinshazhou in Guangzhou [J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(2): 167-174.
- [18] 耿光旭. 深圳岩溶地区的岩土工程问题及对策 [C]. 广东省首届地球科学与工程学术大会论文集. 2017: 99-107.
- GENG Guangxu. Problems and countermeasures of geotechnical engineering in Shenzhen Karst area [C]. Proceedings of the first Earth Science and Engineering Conference of Guangdong Province. 2017: 99-107.
- [19] 蒙彦, 郑小战, 雷明堂, 李卓骏, 贾龙, 潘宗源. 珠三角地区岩溶分布特征及发育规律 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 746-751.
- MENG Yan, ZHEN Xiaozhan, LEI Mingtang, LI Zhuojun, JIA Long, PAN Zongyuan. Karst distribution and development in the Pearl River Delta [J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 746-751.
- [20] 蒋小珍, 雷明堂. 岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用 [J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 786-791.
- JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Monitoring technique and its application of karst groundwater-air pressure in karst collapse [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 786-791.
- [21] 蒋小珍, 雷明堂, 管振德. 湖南宁乡大成桥充水矿山疏干区岩溶系统水气压力监测及突变特征 [J]. *中国岩溶*, 2016, 35(2): 179-189.
- JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, GUAN Zhende. Character of water or barometric pressure jump within karst conduit in large strong drainage area of karst water filling mine in Dachengqiao, Ningxiang, Hunan [J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(2): 179-189.
- [22] 王晓明, 王秀辉, 文望, 李功宇. Dupuit稳定井流公式的模型分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6): 73-75, 81.
- WANG Xiaoming, WANG Xiuhui, WEN Wang, LI Gongyu. Model analysis of Dupuit's steady well flow formula [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(6): 73-75, 81.
- [23] 王军辉, 王峰. 论抽水的降落漏斗范围、影响半径与环境影响范围 [J]. 水利学报, 2020, 51(7): 827-834.

- WANG Junhui, WANG Feng. Discussion on the range of groundwater depression cone, radius of influence and scope of environmental impacts during pumping[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7):827-834.
- [24] 凤蔚,王晓燕,刘振英,李文鹏,李海涛.松散岩类承压含水层影响半径计算方法 [J]. 人民黄河, 2017, 39(12):57-61.
- FENG Wei, WANG Xiaoyan, LIU Zhenying, LI Wenpeng, LI Haitao. Calculating Methods of Influence Radius in the Confined Aquifer of Loose Stuff[J]. Yellow River, 2017, 39(12): 57-61.
- [25] 钱学溥,于义强. 引用影响半径理论公式及其应用 [J]. 工程勘察, 2019(6):43-49.
- QIAN Xuepu, YU Yiqiang. Theoretical equation on quoted influence radius and its application[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(6):43-49.
- Zhou Z, Xu Y L, Zhu C Q, Xu M T, Jin Z Y. Collapse Mechanism of Shallow-Buried Karst Cave Under the Effect of Mining[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(2): 1521-1532.
- [26] 潘宗源,陈学军,杨鑫,宋宇,张铭致.湖南郴州地区岩溶塌陷分布规律及其影响因素浅析[J].中国岩溶, 2021, 40(2): 221-229.
- PAN Zongyuan, CHEN Xuejun, YANG Xin, SONG Yu, ZHANG Mingzhi. Distribution and influence factors of sinkholes in the Chenzhou area, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 221-229.
- [27] 潘宗源,陈学军,杨鑫,宋宇,张铭致.湖南郴州地区岩溶塌陷分布规律及其影响因素浅析[J].中国岩溶, 2021, 40(2): 221-229.

Study on the delimitation of affected zone of geological environment for karst underground engineering: taking Longgang district, Shenzhen City as an example

WU Shengtang^{1,2}, JIANG Xiaozhen¹, MA Xiao¹, TANG Zhen¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CGS, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract The construction of a large number of urban underground rail transit and urban renewal projects has intensified the urban karst geological disasters in our country. As one of the first demonstration areas of national urban construction, Shenzhen has developed rapidly in terms of underground rail transit and urban renewal projects over the years, hence leading to frequent karst collapse disasters due to its location in the karst area. Therefore, the summary of the experience and lessons from the development of karst underground space is of great significance for the engineering construction in karst areas. In this thesis, a preliminary study on the delimitation of the affected zone of geological environment for karst underground engineering is conducted based on three events of karst ground collapse in Shenzhen.

The affected zone of geological environment for karst underground engineering refers to the area where disasters are likely to happen due to the disturbance and damage of the rock and soil around the construction site during the construction process. The delimitation of the affected zone is not only conducive to the safe and smooth engineering construction, but also to the clear division of responsibility. The monitoring range of underground engineering construction in karst area usually reaches only tens of meters at the current stage. But when a disaster happens, the actual range influenced by engineering will often exceed hundreds of meters. Therefore, the current construction specification about the affected zone of geological environment for karst underground engineering is unreasonable and uncertain in some degree, and the relevant provisions are greatly challenged. For instance, it is stipulated that the engineering monitoring should be conducted within the plane range that is only 3 times as deep as the foundation pit during construction, and the description of the expansion of the monitoring range in the karst development area is not detailed. Therefore, the further research on the affected zone of geological environment for karst underground engineering is very necessary, so the actual affected range of the project can be effectively judged, and then the corresponding prevention and control measures can be taken.

On the basis of fully mastering the regional geological background and the geological conditions of site

engineering, a preliminary study is conducted in this thesis. Firstly, the actual affected range of the project is monitored and analyzed by the high-frequency monitoring technology of karst groundwater pressure. The monitoring scheme should be formulated according to local conditions. The monitoring frequency should capture the disturbance changes of regional karst groundwater with more than 3-month monitoring cycle. The results of monitoring and data measurement of water levels indicate that the affected range of the project is closely connected with the karst groundwater drawdown funnel. The obvious anisotropy of karst aquifer medium at each site is indicated in the groundwater flow field, which is mainly controlled by karst development and structure. The maximum affected ranges of the three projects are 560 m, 820 m and 850 m respectively. Then, the analysis on the formation mechanism of karst collapse is conducted. Results indicate the collapse mechanism. The excavation and precipitation of foundation pit leads to the change of groundwater hydrodynamic internally caused of strong karst development, the change of hydrodynamic conditions disturbs karst groundwater or gas, and the force generated by karst water disturbance acts on the overburden floor through karst pipeline or crack. As a result, the overburden soil mass collapses and loses gradually, until the roof becomes unstable and damaged for the insufficient collapse resistance. Finally, the Gehart's empirical formula of influence radius of confined water pumping hole is used for reference, combined with engineering construction parameters, main factors of karst collapse and hydrogeological test parameters. The mixed research method of qualitative analysis and quantitative calculation is adopted to theoretically deduce the empirical calculation formula of the affected zone of geological environment for karst underground engineering. Research results indicate that the affected range of karst underground engineering is mainly in direct proportion to the permeability coefficient and engineering depth. However, it is inversely proportional to the thickness of soil layer. The deduced semi-quantitative theoretical formula is suitable for the calculation of a relatively thick aquifer between the Quaternary and the karst aquifer. If the depth of foundation pit is greater than that of rock surface and of confined karst water in underground engineering, this fomular can be used to quickly provide the basis for safety construction of underground engineering as well as urban disaster prevention and reduction in the karst area lacking groundwater monitoring data.

Key words karst underground engineering, karst groundwater and gas pressure monitoring, affected zone for engineering, pumping test, empirical formula

(编辑 张玲)

~~~~~

(上接第 846 页)

is no obvious negative skewness. The  $\delta^{13}\text{C}$  value is between  $-2.0\text{\textperthousand}$  and  $2.5\text{\textperthousand}$ , and the  $\delta^{18}\text{O}$  is between  $-13.0\text{\textperthousand}$  and  $-9.0\text{\textperthousand}$ . Due to the increase of temperature and pressure in the closed system during the burial peirod, there gradually precipitates and forms dolomite. (4) In the deep-buried or hydrothermal karst environment, the  $\delta^{18}\text{O}$  value of fillings is obviously negative, and high-temperature fluid flows up along the fault to form the karst dissolution space which becomes the reservoir place of various deposits. The hydrothermal karst with high temperature and the atmospheric freshwater karst are the main periods of the formation of deep karst fracture-cavity filling in Huanjiang area. The research results are of great significance for deep karst reservoir prediction and deep resource exploration in the later stage.

**Key words** carbon and oxygen isotopes, deep karst, ancient environment, karst period, Huanjiang sag

(编辑 黄晨晖)