

易守勇, 贾龙, 韩庆定, 等. 佛山市富湾冲孔桩施工引发岩溶地面塌陷机理分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1144-1155.

DOI: 10.11932/karst20240511

佛山市富湾冲孔桩施工引发岩溶地面塌陷机理分析

易守勇¹, 贾龙², 韩庆定¹, 罗锡宜¹, 邹杰¹

(1. 广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质调查局岩溶塌陷防治重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 在岩溶区冲孔桩施工处置不当, 往往会引起严重的地面塌陷。文章针对佛山富湾冲孔桩施工引发的岩溶地面塌陷事件, 在野外调查和测量的基础上, 采用钻探和物探等方法, 对岩溶地面塌陷地质条件及其形成机理进行研究。研究表明其成因主要有: ①基岩砾状灰岩纯度较高, 地质构造作用强烈, 溶洞极为发育。②第四系底部广泛分布含泥质砂层和残积土层, 且砂层分布广、厚度大。③地下水位埋深浅、与地表水力联系强、位于地下水径流通道上, 紧靠西江, 地下水作用强烈。④受人类工程活动影响, 冲孔桩施工振动作用直接引发地面塌陷。其形成过程可归纳为裂隙期→溶洞期→土洞期→塌陷期→群塌期等五个阶段。因此, 在岩溶区冲孔桩施工之前, 应开展岩溶专项勘查, 针对性制定施工方案, 在揭穿岩溶通道过程中, 特别要加强对岩溶地下水的监测, 以保证工程施工和人员安全。

关键词: 岩溶塌陷; 岩溶发育特征; 成因机理; 力学特征分析

创新点: 针对佛山富湾冲孔桩施工引发的岩溶地面塌陷事件, 围绕6个钻孔布置46条测线, 利用测孔深入地下进行立体的无限全空间探测, 在其周边40 m的范围内高精度地探测岩溶地质发育情况, 分析岩溶地面塌陷地质条件和形成过程。

中图分类号: TU753 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1144-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

近年来随着人类工程活动强度的增大, 抽取地下水, 地下工程排水^[1]、矿山疏干^[2]、爆破^[3]、桩基施工^[4-5]、钻探工程^[6]等人类活动诱发岩溶地面塌陷^[7], 已成为妨碍岩溶区经济社会发展的一个重要问题。其中基础施工中常用的冲孔桩施工, 如果在岩溶区施工处置不当, 往往会引起严重的地面塌陷灾害^[8-9]。例如2014年9月武汉市江夏区法泗街大桥桩基冲孔桩施工诱发了大规模的地面塌陷, 影响范围长约

1800 m, 宽约300 m, 塌陷区塌陷坑及地表沉陷总面积约 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 共计19处地面塌陷, 造成房屋和电线杆等倾斜、损毁, 金水河河堤垮塌, 施工方钻机被埋, 工程被迫停工达1年之久^[10]。2019年12月, 深圳市龙岗区某城市更新单元建设场地桩基施工, 诱发500 m外龙岗河河道出现直径约1 m的塌陷坑, 并不断有泥浆冒出, 可测深度达12.5 m, 并在龙园路上形成直径约22 m, 中心最大沉降量大于38 cm的塌陷坑。

以往研究表明, 冲孔桩施工诱发塌陷的原因可

资助项目: 中国地质调查项目(DD20230441); 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026028); 中国地质科学院基本科研业务费项目(2021010, 2020005, 2023016, 2023013)

第一作者简介: 易守勇(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 287545080@qq.com。

通信作者: 贾龙(1985—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事岩溶工程地质安全的研究。E-mail: jialong12@foxmail.com。

收稿日期: 2023-11-12

分为两大类: 扰动岩溶地下水^[2]和破坏岩溶地层结构^[11]。而实际过程中事故发展往往更为复杂, 并可引发塌陷群及次生灾害链^[12]。本文以佛山富湾冲孔桩施工引发的岩溶地面塌陷事件为例, 开展事故过程和条件分析, 在系统收集区内区域地质、水文、环境等资料的基础上, 通过野外调查和勘察等手段, 查明其岩溶地面塌陷地质条件, 并对其形成机理进行研究, 加深对桩基施工引发岩溶地面塌陷地质灾害的认识, 为岩溶地面塌陷的科学防灾减灾奠定基础。

1 研究区概况

研究区位于广东省佛山市, 地处粤港澳大湾区腹地的三洲盆地北部(图1)^[13]。在研究区北西侧、北东侧和东南侧发育三组断裂组, 分别为长坑滑脱断裂组、西江断裂组和桂田断裂组。地面塌陷位于西江断裂组和长坑滑脱断裂组交汇处南侧约0.5 km。地面塌陷区域紧靠西江, 属西江南岸河漫滩地带地下水较丰富。该区域临近城镇居民区, 地表被人工

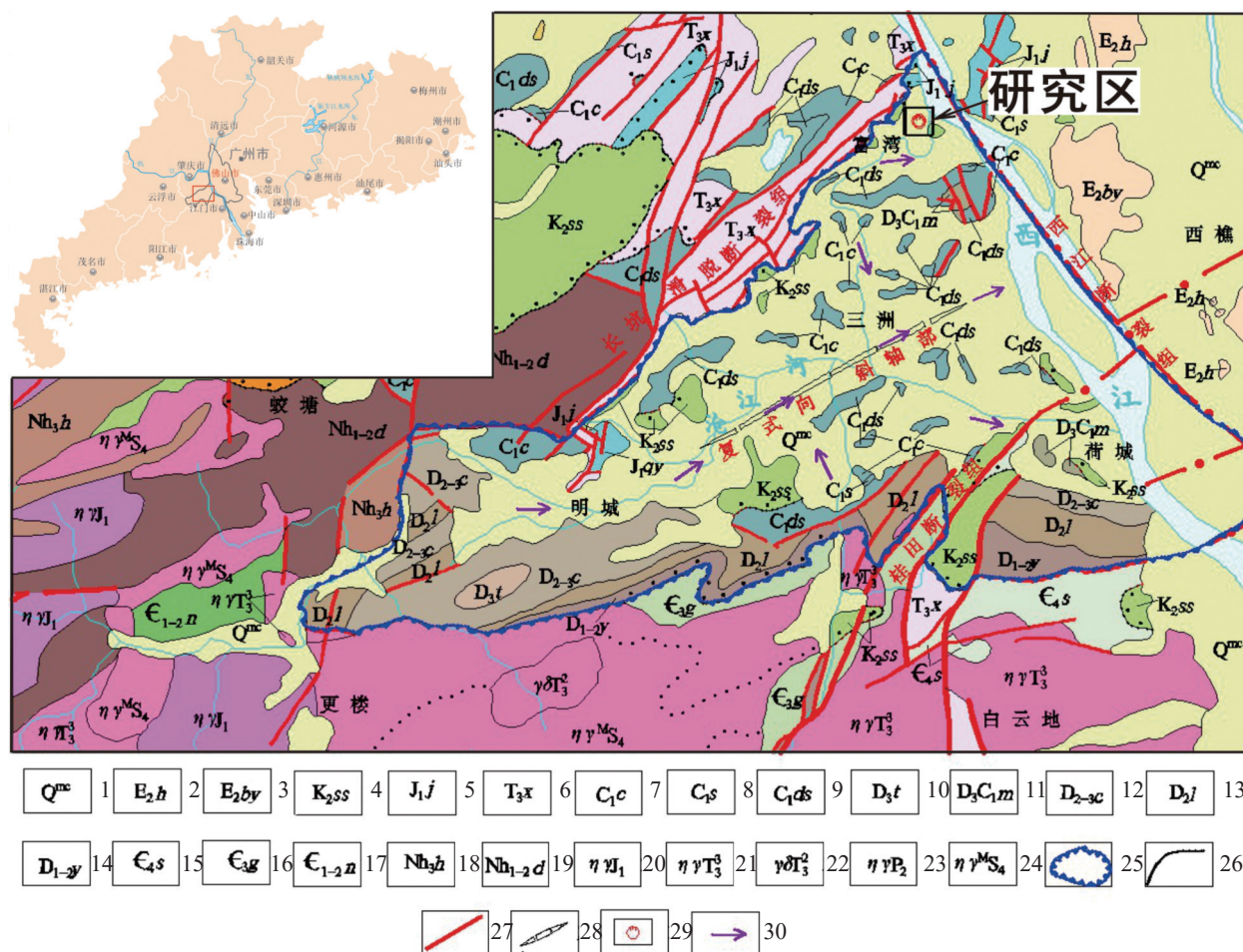


图1 研究区地质图(据1:50万广东省地质图修编)

1.第四系海陆交互相沉积层 2.古近系华涌组 3.古近系宝月组 4.白垩系三水组 5.侏罗系金鸡组 6.三叠系小坪组 7.石炭系测水组 8.石炭系石磴子组 9.石炭系大赛坝组 10.泥盆系天子岭组 11.石炭—泥盆系帽子峰组 12.泥盆系春湾组 13.泥盆系老虎头组 14.泥盆系杨溪组 15.寒武系水石组 16.寒武系高滩组 17.寒武系牛角河组 18.南华系活道组 19.南华系大蚰山组 20.侏罗系二长花岗岩 21.三叠系二长花岗岩 22.三叠系花岗闪长岩 23.二叠系二长花岗岩 24.志留系二长花岗岩 25.三洲盆地范围 26.地质界线 27.断层 28.向斜轴部 29.岩溶地面塌陷区 30.地下水径流方向

Fig. 1 Geological map of the study area (revised according to 1:50,000 geological map of Guangdong Province)

1.Quaternary marine and terrestrial sedimentary layers 2.Paleogene Huayong formation 3.Paleogene Baoyue formation 4.Cretaceous Sanshui formation 5.Jurassic Jinji formation 6.Triassic Xiaoping formation 7.Carboniferous Ceshui formation 8.Carboniferous Shidengzi formation 9.Carboniferous Daisaiba formation 10.Devonian Tianziling formation 11.Carboniferous-Devonian Maozifeng formation 12.Devonian Chunwan formation 13.Devonian Laohutou formation 14.Devonian Yangxi formation 15.Cambrian Shuishi formation 16.Cambrian Gaotan formation 17.Cambrian Niujiuaohe formation 18.Neogene Huodao formation 19.Neogene Dajianshan formation 20.Jurassic bimodal granite 21.Triassic bimodal granite 22.Triassic granodiorite 23.Permian bimodal granite 24.Silurian bimodal granite 25.area of Sanzhou basin 26.geological boundary 27.fault 28.anticline axis 29.area of karst ground collapse 30.direction of groundwater flow

填土以及第四系土层覆盖,属于隐伏岩溶区,周边工程建设均面临较复杂的岩溶地质问题。

2 岩溶地面塌陷特征

富湾安华路岩溶地面塌陷共发生 3 处,分别位于北东部富湾镇北侧安华路沿线楼房边(编号为 TX1)、道路上(TX2)和菜地地带(TX3)(图 2)。其中,2011 年 1 月 13 日有 2 处岩溶地面塌陷(TX1, TX2),2011 年 1 月底(TX3),特征参数见表 1。

TX1 塌陷坑呈圆形,直径约 15 m,可见深度 1~2 m,塌陷坑内充满水,塌陷坑附近地面出现多宽几毫米至几厘米不等的条环形裂缝,最外围的环形裂缝所构成的影响范围为 35 m×25 m,造成安华路一座三层房屋整体向北东倾斜 15°~25°,后拆除重建。TX2 塌陷坑呈近圆形,直径约 30 m,可见深度 4~5 m,塌陷坑内有水,塌陷坑附近地面出现多条环形裂缝,其长轴方向沿安华路展布,造成安华路长约 75 m 的路段损坏。TX3 塌陷坑呈近圆形,直径约 2 m,可见塌陷坑深度约 0.5 m,塌陷坑内充满水,最外围的环

形裂缝所构成的影响范围为 4 m²。

3 岩溶地面塌陷地质条件分析

在野外调查和测量的基础上,通过钻探和物探等手段,分析岩溶地面塌陷地质条件。在塌陷附近区域共完成 37 个钻孔,总进尺 1 950 m。并围绕其中 6 个测孔(ZK6, ZK13, ZK15, ZK22, ZK18 和 ZK31),采用全方位探测方法(专利号 201010159701.1)进行立体的无限全空间探测,即利用测孔,深入地下探测,并在其周边 40 m 的范围内高精度地探测岩溶地质发育情况。共完成 46 条全方位探测法测线,测线物理长度 2 990 m,具体位置见图 3。

3.1 工程地质条件分析

钻探结果表明,研究区地层分为第四系人工填土层(Q^{ml})、海陆交互相沉积层(Q^{mc})和残坡积层(Q^{edl})及早侏罗世金鸡组砾状灰岩基岩层(J_j)4 个地层,可细分为 15 个工程地质层(表 2,图 4)。分布广泛的第②-2、②-8 层和局部分布的第②-5 层淤泥与淤泥质土为

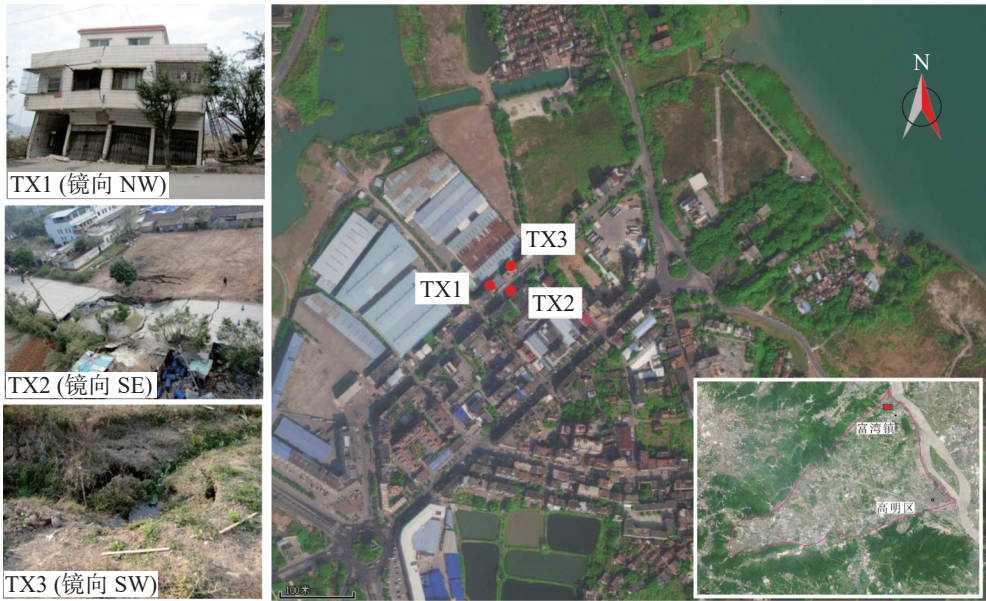


图 2 岩溶地面塌陷群分布位置图
Fig. 2 Distribution and location of karst collapse group

表 1 岩溶地面塌陷地质灾害特征说明表

Table 1 Description of geological hazard characteristics of karst ground collapse

编号	面积/m ²	形状	规模/m	深度/m	始发时间	灾害情况
TX1	176	圆形	φ15	1~2	2011/1/13 15:30	3层楼房完全损坏
TX2	706	近圆形	φ30	4~5	2011/1/13 17:30	造成安华路长约 75 m 的路段损坏
TX3	4	近圆形	φ2	0.5	2011 年 1 月底	

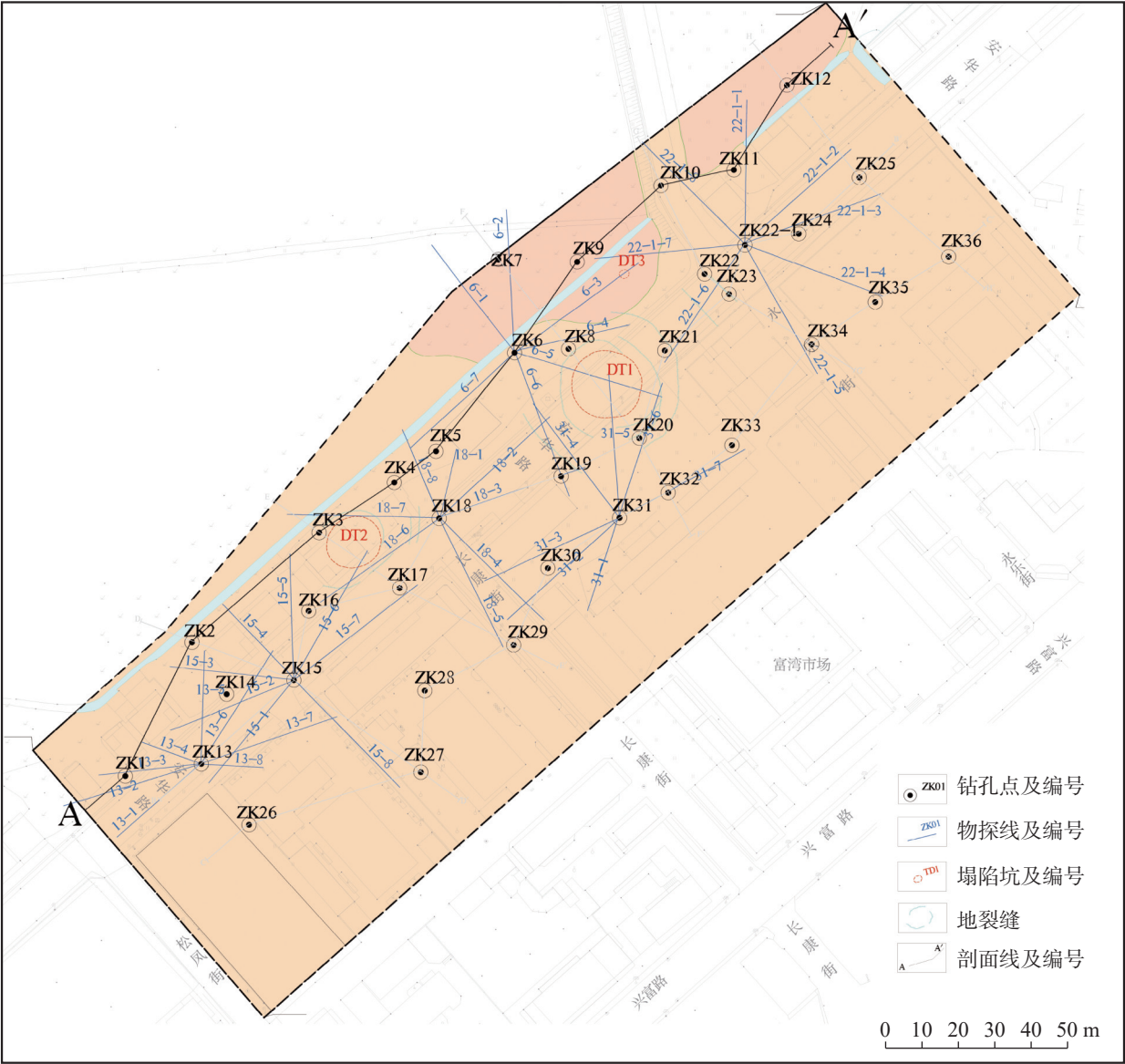


图 3 勘察布置图

1. 钻探点及编号 2.物探线及编号 3.塌陷坑及编号 4.地裂缝

Fig. 3 Survey layout

1.drilling points and numbering 2.geophysical lines and numbering 3.collapse pits and numbering 4.ground fissures

研究区场地主要软土层,厚度 4.80~21.20 m,呈流塑状,承载力低,具高压缩性。第②-4、②-7、②-11 层粉细砂、中粗砂为研究区场地主要砂层,它们与其它局部分布的砂层构成了勘察区的主要含水层和透水层;第②-11 层中砂下部与灰岩质砾岩接触,钻孔中发现的土洞大部分发育于该层土中。第④层灰岩质砾岩,呈微风化状,岩质坚硬,承载力高,岩溶较为发育。

3.2 水文地质条件分析

富湾安华路岩溶地面塌陷群所在区域地下水类型主要有松散岩类孔隙水和覆盖型碳酸盐岩类裂隙

溶洞水(岩溶水)两种,其地下水特征见表 3。研究区紧靠西江,处于地下水强径流和强交换带上,地下水和地表水联系密切且含水层厚度大,雨季地下水排入西江,旱季西江补给地下水,径流方向有水平向也有垂直向,为区内岩溶发育提供了有利的动力条件。

从地形条件判断,地下水总体自北西向东南径流,最后汇入西江,富湾安华路岩溶地面塌陷群所在区域正处于地下水径流区通道上,加之补给区与排泄区相距近,因此旱季、雨季都处于地下水活动较强烈的地带,形式主要为水平向径流,局部地段垂直向径流活跃,同时为岩溶发育提供有利的动力条件。

表 2 研究区岩土体特征表
Table 2 Characteristics of rock and soil mass in the study area

地层	地层代号	层号	揭露厚度/m	土体特征概述	备注
(1)人工填土	Q^{ml}	(1)	1.00~6.80	填土	隔水层
		(2)-1	0.80~3.70	粉质黏土	相对隔水层
		(2)-2	1.10~24.40	淤泥和淤泥质土	软土层
		(2)-3	0.50~3.10	粉质黏土	
		(2)-4	2.00~9.90	粉砂	含水层和透水层
		(2)-5	1.50~12.90	淤泥质土	软土层
(2)第四系海陆交互相沉积层	Q^{mc}	(2)-6	0.90~12.10	粉质黏土	相对隔水层
		(2)-7	1.90~18.90	中砂和粗砂	含水层和透水层
		(2)-8	0.30~11.90	淤泥质土	软土层
		(2)-9	0.80~3.70	粉质黏土	相对隔水层
		(2)-10	0.40~4.10	粉细砂	含水层和透水层
		(2)-11	1.10~25.90	中砂	含水层和透水层
		(2)-12	2.90~11.10	粉细砂	含水层和透水层
(3)第四系残积层	Q^{edl}	(3)	2.30~7.70	残坡积土	相对隔水层
(4)早侏罗世金鸡组	J_j	(4)	2.10~16.10	微风化灰岩质砾岩	岩溶发育, 岩溶含水层

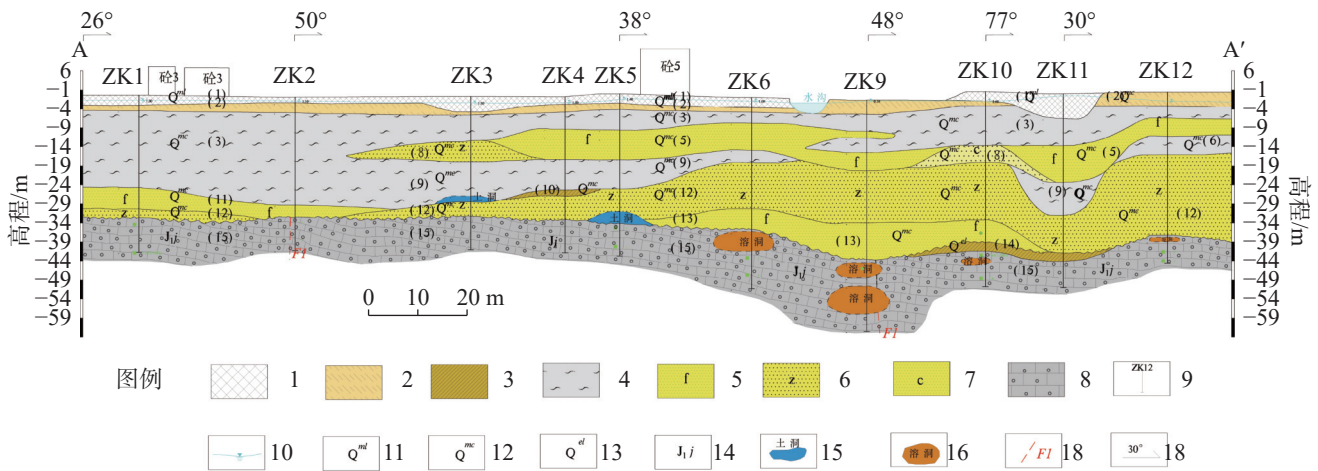


图 4 A-A' 地质剖面图

1.填土 2.粉质黏土 3.黏土 4.淤泥 5.粉砂 6.中砂 7.粗砂 8.砾状灰岩 9.钻孔及编号 10.地下水位线 11.人工填土 12.海陆交互沉积层 13.残坡积层 14.金鸡组 15.土洞 16.溶洞 17.推测断层及编号 18.剖面方向

Fig. 4 A-A' geological profile

1.earth fill 2.silty clay 3.clay 4.silt 5.silty sand 6.medium sand 7.coarse sand 8.gravel limestone 9.drilling holes and numbering 10.groundwater level 11.artificial fill 12.interoceanic sedimentary layer 13.residual slope deposit 14.Jinji formation 15.earth caves 16.karst caves 17. fault identification and numbering 18.profile direction

据安华路附近水文观测孔观测资料, 区内溶洞水水位普遍比松散土层水位高 0.5 m 左右, 说明区内溶洞水具有承压性, 反映出该区域断裂导水性较好, 是区内岩溶发育另一有利水文条件。

3.3 地质构造条件分析

野外调查、钻探和物探资料揭露, 所在区域地质构造复杂, 至少存在两组次级断裂交汇, 推测其中一

组断裂走向北东、另一组断裂走向东西(图 5), 其中, ①北东向隐伏断裂(F1): 推测破碎带走向约 NE45°~50°, 宽度 80 m 以上, 断距不大, 断裂性质及近代活动性不明; ②东西向隐伏断裂(F2): 钻探揭露岩芯破碎, 孔中漏水, 溶洞具 2~4 层多层特征。

3.4 岩溶发育特征

研究区 37 个钻孔中有 8 个钻孔揭露到土洞, 见

表 3 研究区地下水特征表
Table 3 Groundwater characteristics in the study area

地下水类型	地下水特征描述
松散岩类孔隙水	主要赋存于第四系海陆交互相沉积层和残积层中,含水介质主要有第(2)-4、(2)-7、(2)-10、(2)-11和(2)-12层砂层,厚度3.10~35.40 m,含水层之间的隔水层主要为第(2)-2、(2)-5、(2)-8层淤泥、淤泥质土,自西南向东北含水层逐渐变厚,砂层之间连通性由西南向东北逐渐变好,且下部砂层大部分直接覆盖于基岩之上,与基岩连通性较好;大部分第四系松散岩类孔隙水上部为潜水、下部为微承压水,与地表水的水力联系较密切,水位埋深1.46~2.68 m,水位高程+2.81~+3.50 m,富水性中等;水化学类型为HCO ₃ -Ca-Na,矿化度0.26 g·L ⁻¹
覆盖型碳酸盐岩类裂隙溶洞水	主要赋存于早侏罗世金鸡组(J _j)砾状灰岩的裂隙和溶洞中,由于地下岩溶发育且分布极不均匀,岩溶多呈半充填或无充填状态,仅个别全充填,充填物为黏性土、砂砾等,富水性以中等为主,局部较为丰富,单井涌水量一般150~500 m ³ ·d ⁻¹ ,水位埋深1.30~1.60 m,为承压水,水化学类型以HCO ₃ -Ca为主,矿化度0.81 g·L ⁻¹



图 5 土洞发育分布图
Fig. 5 Development distribution of soil caves

洞率高达 21.60%, 见图 5、表 4。其中有 7 个钻孔揭露的土洞发育在第四系最底层中砂与微风化砾状灰岩之间; 1 个钻孔揭露的土洞发育于第四系最底层中砂顶部。8 个土洞中有 7 个呈无充填状态, 1 个呈半

表 4 研究区土洞特征表
Table 4 Characteristics of soil caves in the study area

序号	孔号	基岩埋深/m	土洞分布埋深/m	洞高/m	充填情况	洞顶岩性	洞底岩性
1	ZK3	31.50	26.20~27.70	1.50	无	淤泥	中砂
2	ZK5	34.10	31.00~34.10	3.10	无	中砂	灰岩质砾岩
3	ZK17	38.40	32.60~38.40	5.80	无	中砂	灰岩质砾岩
4	ZK23	42.50	39.50~42.50	3.00	无	中砂	灰岩质砾岩
5	ZK25	48.20	44.50~48.20	3.70	无	中砂	灰岩质砾岩
6	ZK30	37.80	37.80~44.90	7.10	半充填	中砂	灰岩质砾岩
7	ZK32	44.50	14.70~17.80	3.10	无	中砂	灰岩质砾岩
8	ZK35	46.80	37.00~46.80	9.80	无	中砂	灰岩质砾岩

充填状态, 充填物质主要有软—流塑状黏性土, 说明该区域土洞与溶洞连通性较好, 土洞特征详见表 4。

研究区 37 个钻孔中有 16 个钻孔揭露到溶洞, 见洞率为 43.24%, 单孔线岩溶率 11.46%~82.93%。溶洞多呈充填或半充填状态, 仅 5 个溶洞无充填物, 充填物为流塑—可塑黏性土, 含少量砂和砾石等, 成分较杂, 钻孔揭露溶洞特征详见表 5。

根据 6 个测孔 (ZK6, ZK13, ZK15, ZK22, ZK18 和 ZK31) 的 46 条全方位探测法测线的探测结果, 各测线的视电阻率 ρ_s 反演图 (图 6) 大体上呈两层结构: 上层为低阻层, 对应覆盖层 (包括全、强风化岩), 视电阻率在 20~300 $\Omega \cdot m$ 范围, 第二层为高阻层, 对应弱、微风化灰岩或砂岩, 视电阻率在 70~1 000 $\Omega \cdot m$ 范围, 视电阻率结构分界面差异明显。第二层内的局部相对低阻异常区往往对应岩溶发育带或断裂构造带。据此圈定了研究区低阻异常区 25 个, 推测为岩溶洞穴发育区, 推测洞顶埋深 35~43 m, 洞高

2~12 m, 大部分呈无充填状态 (充水), 极少量呈半充填状态。由图 7 可知, 溶洞与土洞发育分布基本一致, 亦为北东向断裂所控制。

4 岩溶地面塌陷影响因素

(1) 基岩砾状灰岩纯度较高、地质构造作用强烈、溶洞极为发育, 为岩溶地面塌陷的发生奠定了基础。下侏罗统金鸡组 (J_j) 砾状灰岩呈厚层状, 砾石成分以灰岩为主, 约占砾石的 50%, $CaCO_3$ 含量大于 95%, 属纯度较高的碳酸盐岩, 为溶洞发育的有利物质条件; 区域上受北西往南东滑脱构造和北东向、北西向断裂构造的交织作用, 岩层变形强烈、基岩节理、裂隙发育, 为地下水汇集和运移提供了便利通道, 为溶蚀反应创造了有利条件。

(2) 第四系底部广泛分布的含泥质砂层, 为土洞的发育提供了有利物质基础。该区域基岩面上覆土

表 5 研究区溶洞特征表
Table 5 Characteristics of karst caves in the study area

序号	孔号	溶洞分布深度/m	洞高/m	洞顶板岩石厚度/m	充填情况
1	ZK6	35.50~40.40	4.90	0.7	上部充填灰褐色粉质黏土, 下部含有石英卵石
2	ZK7	49.20~50.80	1.60	0.90	半充填, 漏水
3	ZK9	43.00~46.80	3.80	1.00	充填粉质黏土, 角砾 (风化)
		49.00~56.30	7.30	2.20	无充填, 漏水
4	ZK10	43.80~45.10	1.30	1.90	充填粉质黏土
5	ZK12	38.20~39.30	1.10	0.60	充填灰褐色粉质黏土, 含少量角砾
6	ZK17	38.70~39.80	1.10	0.30	无充填
		41.30~44.40	3.20	0.60	充填黄褐色、红色黏土质, 充填物成分复杂, 见有全风化之灰岩碎块
7	ZK22	46.10~51.60	5.50	1.70	充填黄褐色黏土质, 见有灰岩碎块, 钻进较快, 钻至溶洞底部时伴有漏浆现象
		53.20~53.70	0.50	1.60	充填黄褐色黏土质, 钻进快
		53.90~54.40	0.50	0.20	充填黄褐色黏土质, 钻进快
8	ZK22-1	48.90~50.20	1.30	0.70	充填黄褐色黏土质, 钻进快
9	ZK23	45.00~47.70	2.70	2.50	充填粉质黏土, 灰褐、灰黄色, 含少量角砾, 漏水
10	ZK24	51.20~53.40	2.20	1.70	无充填, 漏水
11	ZK25	51.40~54.80	3.40	3.40	充填粉质黏土, 浅褐、灰红色, 含角砾
12	ZK32	45.10~47.80	2.70	0.60	充填粗砂, 漏水
		55.20~56.80	1.60	7.40	半充填, 下部充填细中砂, 底部 0.2 m 为灰岩质砾岩
13	ZK33	45.10~49.20	4.10	1.00	半充填, 下部充填砂粒, 漏水
14	ZK34	46.20~47.00	0.80	0.30	充填, 粉质黏土
		47.40~48.50	1.10	0.40	无充填, 漏水
15	ZK35	46.90~51.30	4.40	0.10	充填少量粉质黏土, 漏水
		52.10~57.90	5.80	0.80	无充填, 于 55.2~55.5 m 夹有灰岩, 漏水
16	ZK36	41.80~46.00	4.20	2.30	半充填, 下部充填粉质黏土, 漏水

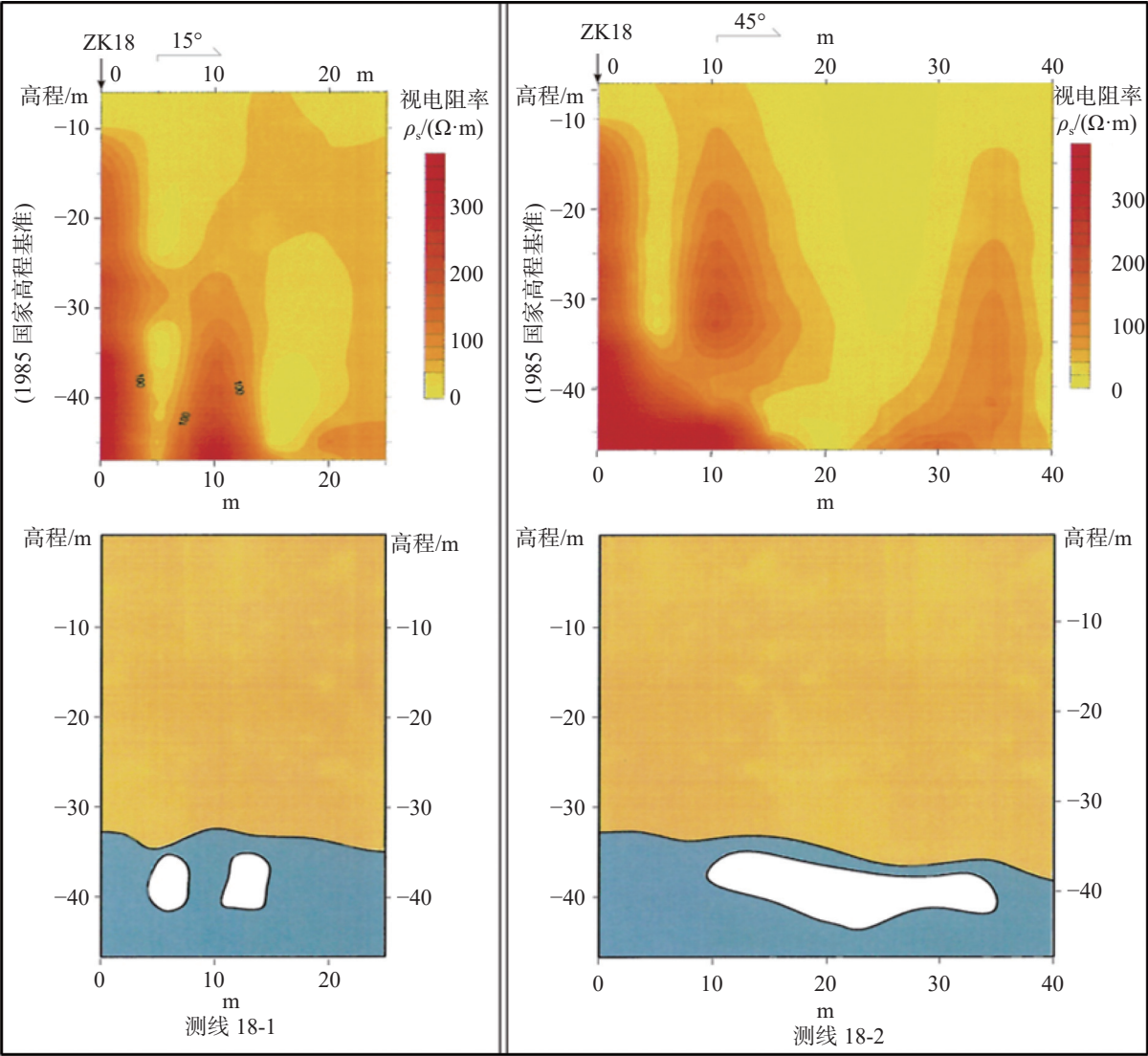


图 6 视电阻率 ρ_s 反演图
Fig. 6 Inversion diagram of apparent resistivity

层以砂层为主,尤其是第②-11层含泥质中砂和第②-12层粉细砂,易发生潜蚀作用,使砂层中细小颗粒流失形成土洞,区内钻孔所揭露的土洞大部分发育在该砂层中。

(3)砂层分布广且厚度大、地下水丰富、水文地质条件复杂。第(2)-4、(2)-7和(2)-11层粉细砂和中粗砂广泛分布,厚度大,与基岩连通性较好,渗透系数达 $1.99 \times 10^{-5} \sim 5.21 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4)水位埋深浅,位于地下水径流通道上,紧靠西江,地下水作用强烈,与地表水力联系强;其次,第四系海陆交互沉积层中透水砂层较厚,地下水通过砂层径流至西江,同时当西江水位上升时亦可接受西江水的渗流,常年反复作用形成地下水强交换带。

(5)人类工程活动影响:2011年1月在安华路冲孔桩施工振动作用直接引发地面塌陷。

5 岩溶地面塌陷群的形成机理分析

富湾安华路一带早期受构造作用基岩出现裂隙,尔后在地壳升降、气象、水文、构造、海进海退等影响因素共同作用下,基岩中的细小节理裂隙逐渐被潜蚀、搬运、扩大形成溶洞,并逐步向基岩面发展,直到揭穿基岩顶板转入土洞发展期;在土洞期间随着季节的变化和海进海退的演变,地下水位亦随之升降变化,地下水侵蚀基准面升降循环往复。当地下水位上升时,长期处于干燥状态的土体逐渐被软化成软弱层;当地下水位持续下降时,土体失去水的



图7 溶洞发育分布图

Fig. 7 Distribution of karst caves

浮托力的同时,水力坡度急剧增大,使孔隙水对土体的潜蚀作用加强,在孔隙间真空负压及地下水的潜蚀作用下,砂层中细小颗粒不断流失,被搬运到下伏砾状灰岩溶洞中,从而在砾状灰岩与上覆砂土层之间形成土洞,并向四周发展、扩大。最终,在人类工程活动冲孔桩施工的触发作用下,导致土洞垮塌形成地面塌陷。冲孔桩施工时因机械敲击桩顶产生振动作用,并通过桩身向其所接触的岩土体和地下水中传递引起共振,改变原有岩土体结构和物理力学性质。加之所在区域第四系底部为砂层,在振动作用下易产生液化,砂土流动进入岩溶管道中,失去砂土原有的骨架支撑作用,大大降低了土洞顶部土体物理力学性质,最终导致土洞垮塌引发地面塌陷。岩溶地面塌陷(TX1)发生时,瞬间大量上部土体和地表水充填原有土洞空间并涌入溶洞内,再次产生强烈的岩土体振动作用和水体波动作用,并向四周传递,破坏四周区域岩土体的原有结构性能,改变其力学平衡极限,引发岩溶地面塌陷(TX2)。

综上,富湾安华路岩溶地面塌陷群的形成过程可归纳为经历了裂隙期→溶洞期→土洞期→塌陷期→群塌期等五个阶段(图8)。

6 结论及建议

(1)富湾安华路岩溶地面塌陷群是由冲孔桩施工触发导致土洞垮塌引发一连串自然塌陷形成的,其成因主要有以下五个方面:①基岩砾状灰岩纯度较高,地质构造作用强烈,溶洞极为发育,为岩溶地面塌陷的发生奠定了基础。②第四系底部广泛分布的含泥质砂层和残积土层,为土洞的发育提供了有利物质基础。③砂层分布广且厚度大、地下水丰富、水文地质条件复杂。④地下水位埋深浅、与地表水力联系强,位于地下水径流通道上,紧靠西江,地下水作用强烈。⑤2010年底至2011年1月受冲孔桩施工振动作用引发地面塌陷。

(2)富湾安华路岩溶地面塌陷群的形成过程可归纳为经历了裂隙期→溶洞期→土洞期→塌陷期→群塌期等五个阶段。塌陷期和群塌期阶段,冲孔桩施工中地下水位发生反复波动中,通过岩—土—水媒介向四周传递,破坏四周区域岩土体的原有结构性能,改变原有的力学平衡极限,引发附近其他岩溶地面塌陷。

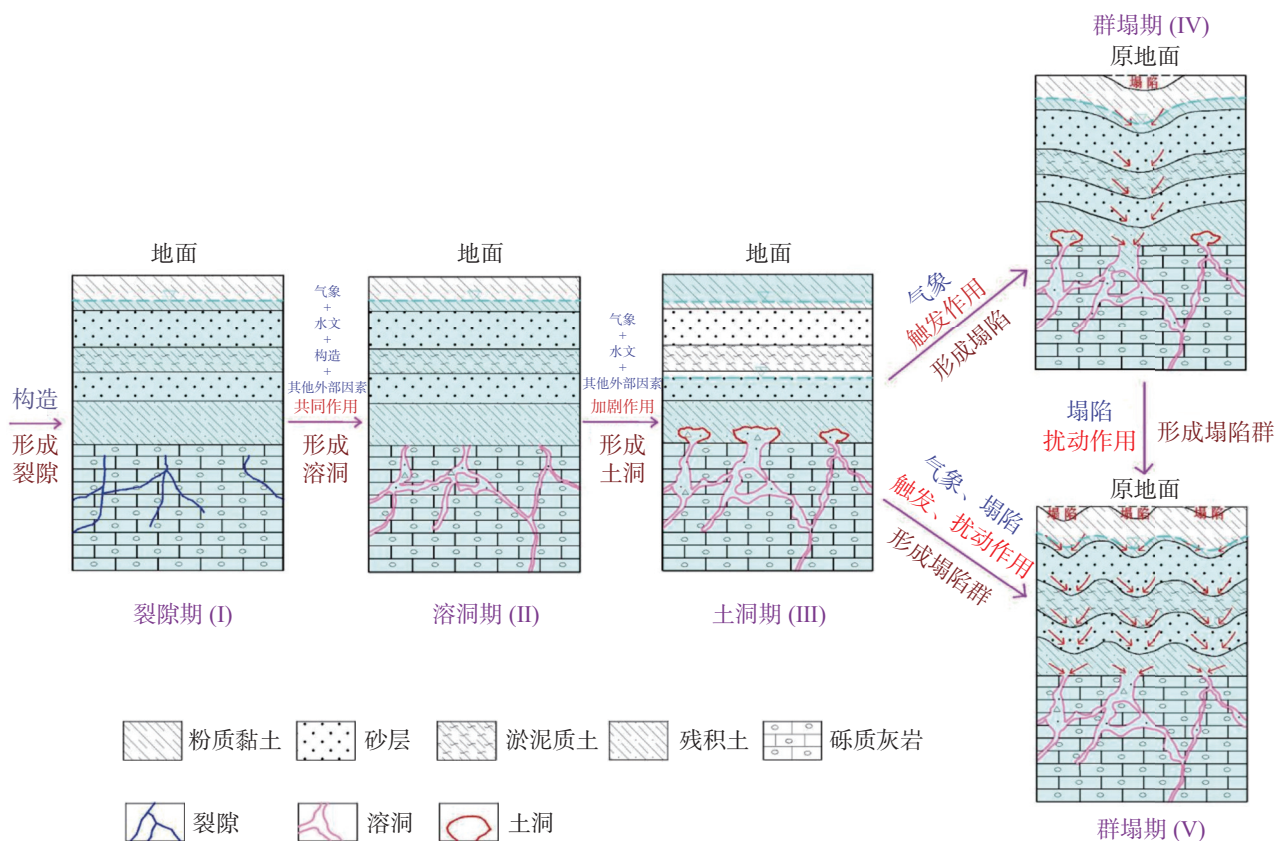


图8 岩溶地面塌陷群形成过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of formation process of karst ground collapse group

(3)建议在岩溶区冲孔桩施工前,应开展岩溶专项勘查,查明岩溶通道的展布特征,同时,应制定针对性施工方案,在揭穿岩溶通道过程中,特别要加强对岩溶地下水的监测预警,以保证工程施工和人员安全。

参考文献

- [1] 蒙彦, 黄健民, 贾龙. 基于地下水动力特征监测的岩溶塌陷预警阈值探索: 以广州金沙洲岩溶塌陷为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 408-414.
MENG Yan, HUANG Jianmin, JIA Long. Early warning threshold of sinkhole collapse based on dynamic characteristics from groundwater monitoring: A case study of Jinshazhou of Guangzhou, China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(3): 408-414.
- [2] Jiang Xiaozhen, Lei Mingtang, Gao Yongli, Guan Zhende. Characterization of karst collapse hazard based on groundwater fluctuations in Qingyun village, Guigang, Guangxi, China[C]//National Cave and Karst Research Institute Symposium, 2013: 321-326.
- [3] 冯佐海, 陈南春, 韦继武. 桂林市柘木岩溶塌陷成因及其分布的基本特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(3): 85-89, 106.
FENG Zuohai, CHEN Nanchun, WEI Jiwu. Security prediction of railway in the land subsidence area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(3): 85-89, 106.
- [4] 马晓, 蒋小珍, 雷明堂, 李亚军, 贾龙. 桩基施工诱发岩溶塌陷的机理模式及防控措施[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 691-700.
MA Xiao, JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, LI Yajun, JIA Long. Mechanism model and prevention and control measures of karst collapse induced by pile foundation construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 691-700.
- [5] 陈贻祥, 潘科. 综合物探方法在岩溶塌陷探测中的应用分析[J]. 人民长江, 2012, 43(Suppl.2): 9-11, 32.
- [6] 李慧娟, 陈梦源, 梁川, 涂婧. 武汉市长江一级阶地钻探施工诱发岩溶塌陷的形成机制分析[J]. 资源环境与工程, 2022, 36(2): 193-197.
LI Huijuan, CHEN Mengyuan, LIANG Chuan, TU Jing. Formation mechanism analysis of karst collapse caused by drilling in first terrace of Yangtze River in Wuhan City[J]. Resources Environment & Engineering, 2022, 36(2): 193-197.
- [7] 贾龙, 蒙彦, 潘宗源, 殷仁朝. 钻孔雷达反射成像在岩溶发育场地探测中的应用[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 124-129.
JIA Long, MENG Yan, PAN Zongyuan, YIN Renchao. Study on application of borehole radar reflection imaging in the detection of karst area[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(1): 124-129.

- [8] 辛然. 临桂道光村岩溶塌陷调查方法及影响因素, 成因模拟分析[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2013
- XIN Ran. Investigation methods, influencing factors and cause simulation analysis for the karst collapse in Daoguang village, Lingui county[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2013
- [9] Lei Mingtang, Gao Yongli, Jiang Xiaozhen, Guan Zhende. Mechanism analysis of sinkhole formation at Maohe village, Liuzhou city, Guangxi Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7): 1-11.
- [10] 熊志涛, 刘鹏瑞, 杨涛, 邵勇. 江夏法泗岩溶塌陷区冲孔桩施工引发岩溶塌陷的成因机理[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 120-129.
- XIONG Zhitao, LIU Pengrui, YANG Tao, SHAO Yong. Mechanism of karst collapse caused by punching pile construction in Jiangxia Fasi karst collapse area[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 120-129.
- [11] Jiang Fuwei, Dai Jianling, Lei Mingtang, Qin Youqiang, Jiang Xiaozhen, Meng Yan. Experimental study on the critical triggering condition of soil failure in subsidence sinkholes[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 693-701.
- [12] 张宗胜. 佛山黄岐海北片区岩溶地面塌陷地质灾害成因与趋势分析[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 880-894.
- ZHANG Zongsheng. Origin and trend analysis of karst collapse in Huangqi and Haibei communities, Foshan City[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 880-894.
- [13] 韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰. 广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3): 131-139.
- HAN Qingding, LUO Xiyi, YI Shouyong, ZOU Jie. Characteristics and spatial-temporal distribution of karst collapse in Sanzhou basin, Gaoming district, Foshan City, Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention*, 2021, 32(3): 131-139.

Mechanism analysis of karst ground collapse caused by the construction of punching piles in Fuwan, Foshan City

YI Shouyong¹, JIA Long², HAN Qingding¹, LUO Xiyi¹, ZOU Jie¹

(1. Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan, Guangdong 528000, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamic, MNR & GZAR/ Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract In recent years, the increasing intensity of human engineering activities—such as groundwater extraction, drainage for underground engineering, mine drainage, blasting, pile foundation construction and drilling engineering—has led to karst ground collapses. This phenomenon has become an important issue hindering the economic and social development of karst areas. If construction processes in these karst areas are not disposed properly, the punching pile construction commonly used in foundation construction can often cause severe ground collapse disasters. This article examines the karst ground collapse event triggered by the construction of punching piles in Fuwan, Foshan. Through field investigations and measurements, geological conditions contributing to the karst ground collapse were analyzed with drilling and geophysical exploration. A total of 37 boreholes were drilled in the vicinity the collapse, reaching a distance of 1,950 m. In around six of these boreholes (ZK6, ZK13, ZK15, ZK22, ZK18, and ZK31), a comprehensive exploration method was adopted to conduct three-dimensional infinite full-space exploration. This method utilized boreholes for deep underground exploration and high-precision detection of karst geological development within a 40-meter radius. A total of 46 omnidirectional detection lines were laid out, covering a length of 2,990 m.

Research has shown that the karst ground collapse group on Anhua road in Fuwan is primarily attributed to five factors: (1) The bedrock in this area is composed of high-purity gravel limestone, which is characterized by dense geological structures and numerous karst caves, creating conditions that are conducive to karst ground collapses. (2) The widely distributed muddy sand layers and residual soil layers at the bottom of the Quaternary system provide a favorable material foundation for the development of soil caves. (3) The sand layer is extensively distributed and exhibits a large thickness. Groundwater resources are abundant and the hydrogeological conditions are complex. (4) The groundwater level is shallow and exhibits a strong hydraulic connection with the surface water. This area is located in a groundwater runoff channel, adjacent to the Xijiang river, and experiences frequent groundwater activities.

(5) From the end of 2010 to January 2011, ground collapses occurred due to the vibration generated by punching pile construction.

In addition, the formation of karst ground collapse group on Anhua road in Fuwan can be summarized in five stages: the fissure period, the karst cave period, the soil cave period, the collapse period, and the group collapse period. In the early stage, fissures formed in the bedrock as a result of tectonic action. Subsequently, under the combined influence of factors such as crustal uplift, meteorology, hydrology, structure, and marine transgression and regression, the small joint fissures in the bedrock were gradually eroded and expanded, leading to the formation of karst caves. These karst caves were then gradually developed toward the bedrock surface until the bedrock roof became exposed. This marked the beginning of the development period of soil cave. With the changing seasons and the dynamics of marine transgression and regression, groundwater levels fluctuated. The rise and fall of the groundwater erosion baseline were constantly circulating. When groundwater levels rose, soil that has remained dry for an extended time gradually softened, forming a soft layer. Conversely, as groundwater levels declined, soil lost its buoyancy due to the absence of water, resulting in a sharp increase in hydraulic gradient and an intensified erosive effect of pore water. Under the influence of vacuum negative pressure between pores and the erosion caused by groundwater, small particles within the sand layer were continually displaced and transported to the underlying karst cave characterized by gravel limestone. Therefore, a soil hole was formed between the gravel limestone and the overlying sandy soil layer, and the hole developed and expanded in all directions. During the periods of collapse and group collapse, the construction of punching piles led to repeated fluctuations in the groundwater level. These fluctuations caused groundwater to flow to the surrounding areas through rock, soil and water, which damaged the original structural performance of the surrounding rock and soil, altered the original mechanical equilibrium limit, and triggered additional karst ground collapses in nearby areas.

In summary, it is advisable to conduct a specialized karst exploration prior to the construction of punching piles in karst areas to identify the distribution characteristics of karst channels. At the same time, targeted construction plans should be developed. If karst channels are exposed during the construction process, it is essential to enhance the monitoring of karst groundwater to ensure the safety of both the engineering project and personnel involved.

Key words karst collapse, characteristics of karst development, genetic mechanism, analysis of mechanical characteristics

(编辑 张玲)