

## 岩溶+流砂地质市政桥梁桥头沉陷处理方案研究

彭李立

(广州公路工程集团有限公司, 广东 广州 510075)

**摘要:** 岩溶发育地区地质条件复杂, 桩基施工难度大、进度慢, 加上流砂的影响, 桩基成孔困难, 易发生塌孔、沉陷等地质灾害。城镇建成区市政桥梁周边建筑物密集, 若施工过程中发生地面沉陷, 将影响周边建筑物的稳定性, 造成不良社会影响。文中以广州某市政桥梁为例, 针对岩溶+流砂地质情况下桩基施工中发生的桥头沉陷, 通过分析沉陷原因, 提出补充勘察、沉陷区预注浆、桥头土体加固及桥梁调整等处理方案。

**关键词:** 桥梁; 溶洞; 流砂; 市政桥梁; 桩基; 桥头沉陷

**中图分类号:** U445.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)05-0144-03

桥梁桩基为隐蔽性工程, 施工难点在于如何克服岩溶、流砂等不良地质情况。在岩溶发育+流砂路段, 桩基成孔过程中由于溶洞和流砂的双重影响易发生砂层坍塌、流砂沿开口溶洞流失的现象, 进而引起地下结构层发生改变, 造成成孔困难、地面沉陷变形等。城镇建成区周边建筑物密集, 若施工中出现地面沉陷, 不仅影响施工安全和进度, 对周边建筑物基础的稳定也构成隐患。本文以广州某市政桥梁为例, 针对岩溶+流砂地质情况下桩基施工中的桥头沉陷, 分析沉陷原因及影响, 并从勘察、设计及施工方面研究处理方案, 保证工程质量及安全。

## 1 工程概况

### 1.1 项目简介

广州某市政旧桥拆除重建工程, 桥梁跨越河流, 斜交角为  $70^\circ$ , 桥头两侧为城市建成区, 建筑物密度高, 建筑物层数为六七层。桥梁桩基距离建筑物的最小距离约 7 m。桥梁宽度为 12 m, 跨径组合为  $(10.0+20.0+11.6)$  m, 为预应力混凝土空心板梁桥, 桥梁长度为 43.1 m(含桥台)。

设计过程中为保证桥头房屋安全, 减少基坑开挖深度, 采用柱式桥台、桩柱式桥墩, 每个墩台均有 2 根桩基。桩基按嵌岩桩设计, 长度按照嵌岩深度要求及溶洞顶板持力层厚度控制, 其中 0# 桥台桩长为 66.0 m, 3# 桥台桩长为 34.3 m。

### 1.2 地质状况

如图 1 所示, 项目区灰岩地层岩溶强发育, 土洞、溶洞内虽大部分有填充, 但填充物多为软塑~可

塑的较松散物质, 且部分溶洞顶板厚度较小, 处于暂时稳定状态, 在长期地下水溶蚀作用或外部力量冲

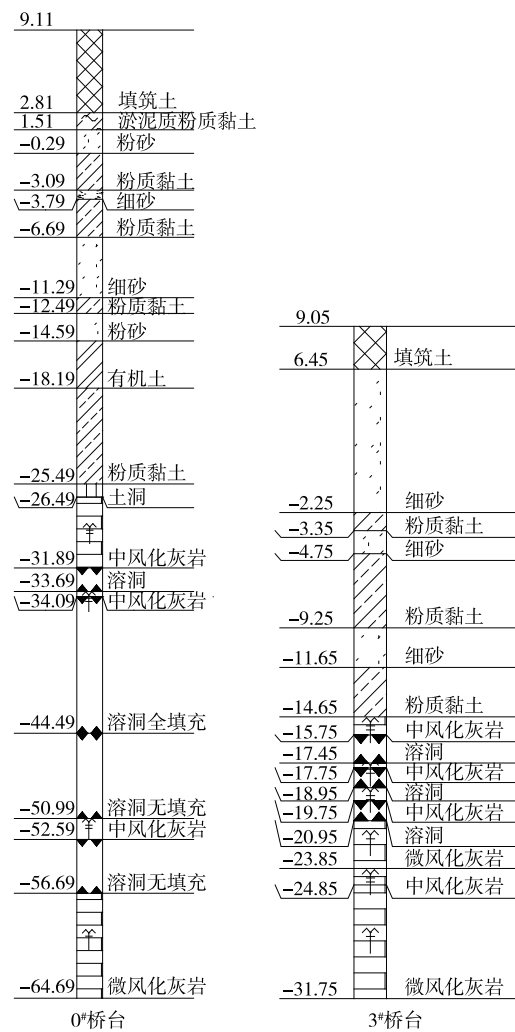


图 1 桥台桩基钻孔柱状图(单位: m)

击(如桩基施工)下易发生溶洞顶板坍塌,造成地面沉陷等地质灾害。场区基岩岩溶水较丰富,为微承压水。全桥共有 8 根桩基,采用“一桩一钻”。覆盖层有细砂及粉砂层,细砂层厚度为 2.8~4.5 m,粉砂层厚度为 0.6~7.1 m。

### 1.3 桥头沉陷

在 3<sup>#</sup> 桥台左侧桩基钻孔深度约 16 m 时发生桥头地面沉陷,沉陷范围以桩基为中心向河堤方向发展,沉陷裂缝呈半圆形分布,沉陷面积约 158 m<sup>2</sup>(见图 2)。

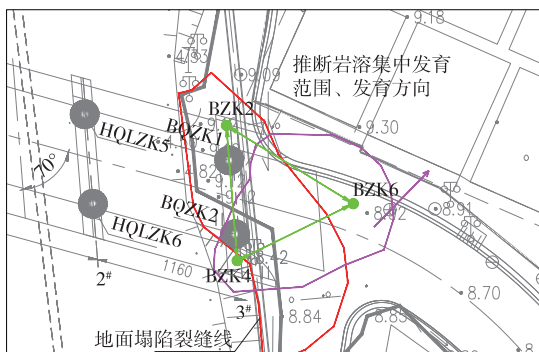


图 2 桥头沉陷区域分布及 CT 探测岩溶发育范围

## 2 处理方案

### 2.1 沉陷原因分析

该项目区溶洞发育,且有流砂、承压水等多种不良地质,沉陷发生于钻孔穿越流砂土层的施工过程中,初步分析沉陷原因主要有施工和地质两方面。

由于地质情况复杂,桩基按照先难后易的顺序施工<sup>[1]</sup>。桥梁共有 4 个墩台,3<sup>#</sup> 桥台左侧桩钻孔前,0<sup>#</sup>~1<sup>#</sup> 墩各顺利完成一根桩基钻孔与混凝土浇筑。0<sup>#</sup> 台处溶洞尺寸大,呈串珠状分布,桩基穿过溶洞群落于稳定岩层上,终孔桩长接近 65.0 m。相较于 1<sup>#</sup> 台,3<sup>#</sup> 台稳定持力岩层深度较浅,设计桩长为 34.3 m,比 1<sup>#</sup> 台桩长短约 30.0 m。但 1<sup>#</sup> 台流砂层深厚,厚度约 12.5 m。

场地内基岩强度较高,考虑到旋挖钻施工效率低,设备要求高,桩基施工选用冲击钻+双层钢护筒工艺。其中内层钢护筒为全护筒跟进,外层钢护筒穿过软弱覆盖层置于中、微风化岩层中。由于地质条件复杂,施工过程中可能会遇到流砂层坍塌、穿越溶洞漏浆、塌孔、掉钻等现象,对护筒埋设深度、冲程、钻孔进尺、泥浆浓度都提出了较高的控制要求。

施工场地溶洞强发育,溶洞呈串珠状分布,溶洞

顶板较薄,不稳定,桩基施工中易发生塌孔。若桩基施工导致溶洞开口连通,桩孔内泥浆容易突然大量流失引发孔壁垮塌甚至地面沉陷。地面沉陷发生时,钻孔深度约 16 m,处于穿越砂土层的过程中。事故桩基所在位置砂土层厚度大,周边施工如果过度降水、钢护筒施工跟进不及时或泥浆护壁压力不满足要求,砂土层受到机械施工扰动会发生沉陷或溶解于泥浆中<sup>[2-3]</sup>,基岩面附近开孔溶洞可能形成流砂通道或泥浆循环流失。随着砂土层的流失,砂土上覆盖层失去支撑作用,进而引起地面沉陷。

### 2.2 处理方案

由于桥头沉陷区紧邻周边建筑物,沉陷发生后立即采取措施避免沉陷区扩大,确保周边建筑物安全。其次进行补充勘察,查明溶洞分布和连通情况,以便确定后续施工方案。因此,沉陷发生后,立即停止桩基施工,并对桩孔进行回填,阻止孔道周围砂土层继续流失。同时对沉陷区进行注浆加固,避免沉陷范围进一步扩大。处理措施及布置方案如下:

(1) 停止桥台桩基施工,并用水泥浆注浆回填桩孔。

(2) 对沉陷范围进行预注浆处理,固化该区域土体。

(3) 对地表沉陷、地下水位、周边建筑物沉降及倾斜情况进行 24 h 监测。

(4) 对桥头沉陷区进行补充勘察,明确溶洞走向、空间分布及连通情况。

(5) 根据补充勘察资料及沉降监测情况确定进一步加固沉陷区的措施。

(6) 研究桥梁或桥台桩基调整及施工方案,确保后续施工安全。

### 2.3 补充勘察

施工时仅有钻探成果,无法判断桥头沉陷区溶洞分布,尤其是溶洞的连通情况和空间分布。为此,除进行地质补充钻孔外,利用跨孔弹性波 CT 对场地区域进行三维空间探测,了解岩体空间分布和发育情况<sup>[4]</sup>。跨孔弹性波 CT 作业配合地质钻孔进行,在桥头沉陷区布置 3 个钻孔,进行弹性波 CT 探测,结果见图 3。

钻孔及 CT 勘察结果显示,场地内岩面起伏较大,岩溶极强发育,溶洞顶板厚度较小,存在开口溶洞。验证了受施工扰动影响砂土层沿溶洞流失,形成地面沉陷及地裂缝的分析结论。

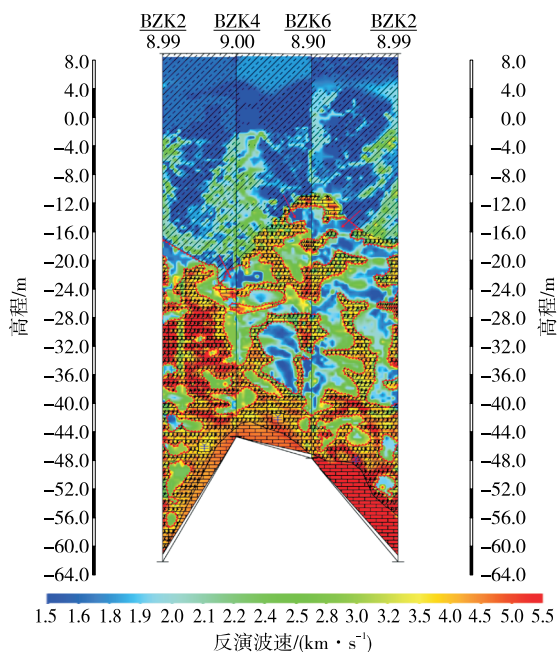


图3 跨孔弹性波CT地质解释剖面图

## 2.4 监测方案

沿沉陷区布置观测点,观测沉陷区及沉陷深度发展趋势。钻孔施工停止后,经过紧急注浆加固后沉陷区基本趋于稳定,没有进一步发展。

根据《建筑地基基础设计规范》要求,若桩基施工对邻近建筑物产生影响,施工期间及使用期间均须进行沉降变形观测。为确保周边建筑物安全,对3#桥台周边30 m范围内4栋建筑物进行沉降和倾斜观测,并每天对房屋门窗、结构、基础变形及裂缝进行巡检。表1为沉陷发生后建筑物沉降变化情况。根据监测数据,在回填桩基钻孔并对沉陷区预注浆加固后,建筑物沉降依旧处于缓慢发展( $A_{3-4}$ 监测点)中,应采取措施控制建筑物基础沉降发展。

表1 周边建筑物沉降监测结果

监测点	沉降变化速率/ (mm·d <sup>-1</sup> )	沉降累积变化 量/mm
$A_{3-4}$	-0.43	-23.71
$A_{3-3}$	-0.02	-23.49
$A_{2-3}$	-0.06	-21.93

注: $A_3$ 为桥头左侧第一栋建筑物,距离沉陷区最近;负号表示下沉。

桥位区基岩岩溶水较丰富,地下水位变化极易引起水土尤其是砂土层沿连通溶洞孔道流失,进一步影响周边地块的稳定性。因此,除监测建筑物沉

降变形外,对地下水位进行监测。

## 2.5 桥头土体加固

根据弹性波CT探测结果,桥头范围为溶洞强发育区,推断溶洞发育范围朝向建筑物方向。预注浆加固后建筑物沉降量依然为0.43 mm/d,且总沉降量接近3 cm,建筑物沉降仍在缓慢发展。因此,须扩大注浆范围,除对沉陷区进行注浆外,在桥头靠近沉陷区的建筑物一侧增加注浆孔。由于溶洞强发育,注浆料沿溶洞通道从地下流失可能性较大,为保障建筑物基础注浆效果,在该建筑物基础周边注浆孔外围增加一排 $D600\text{ mm}@400\text{ mm}$ 旋喷桩,待旋喷桩施工完成后再进行建筑物基础加密注浆,避免注浆料沿溶洞通道方向流失。

## 2.6 桥梁调整方案

桩基钻孔越长,桩基施工难度越大。桥梁桩基在穿越流砂层的过程中发生桥头塌陷,桥梁调整方案有3种:方案一为增加桩基数量,减小桩长<sup>[5]</sup>;方案二为取消桩基础,将桥台改为扩大基础;方案三为调整第三跨桥梁跨径,适当避开桥头沉陷区。

该桥为旧桥拆除重建,为减少河堤开挖,桥梁拆除过程中保留部分旧桥桥台,若减小桥梁跨径,则新旧桥台冲突,桥台桩位无法向小桩号调整,根据桥头沉陷区地质情况,若增加桥梁跨径避开沉陷区,则桥梁跨径增加至少15 m,桥梁工程规模增加较多,经济性差。因此,方案三不可取。

根据桥台基础冲刷深度及地基承载力要求,经初步测算,桥台基础埋深约5 m。考虑到桥台邻近建筑物已发生沉降,地质条件复杂,基坑开挖安全隐患较大,方案二可行性较差。

经过对比分析,桥梁调整采用方案一,即增加桩基数量、减小桩长。桥位左侧建筑物距离较近,桥梁左侧桩基施工空间受限,左侧桩位置保持不变,调整右侧桩基位置,并增加1根桩基,减小单根桩桩长。

考虑到左侧桩在穿越砂土层的过程中孔壁支护措施不足,导致砂土沿开口溶洞流失,在左侧桩继续施工前,对周边土体采用 $D600\text{ mm}@400\text{ mm}$ 高压旋喷桩加固,确保左侧桩第二次冲孔施工时周边土体稳定。

## 2.7 处理效果

3#桥台经过桥头加固处理及桩基方案调整后,桥头周边建筑物沉降趋于稳定,桩基后期施工得以顺利进行。

(下转第150页)

单化、透明化,提前模拟方案的现场施工状态,避免文字描述不明确或理解不透彻等问题,保证施工模拟与现场施工一致。

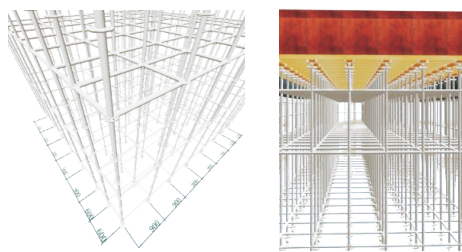


图7 支架布置、安装模拟

#### 4 结语

本文针对异形结构高大模板工程施工的重点和难点,通过 BIM 技术实现高大模板支架的智能化实施,主要研究成果如下:

(1) 三维支架设计智能化。采用 BIM 技术实现异形结构高大模板工程模板支架智能布置,输入参数即可快速布置建模,同时保证靠近墙边的小梁及主梁的悬挑长度。通过支架模型研究,将支架转角数量降至最少,确保高大模板支架布置合理、适用,提高模板支架设计效率。

(2) 复杂结构可视化。作业人员利用 BIM 模型进行内部漫游,对复杂结构的认知不再局限于二维图纸,可以更加形象、直观地理解各类构件在空间上的位置关系,避免产生理解偏差,确保各类构件的施工效率和质量。

(3) 施工模拟动态化。该工程下部结构异型且结构复杂,通过高大模板工程脚手架搭设、复杂节点仿真施工模拟对作业人员进行交底,辅助现场施工,降低施工中修改、返工概率,同时有利于施工过程管理及控制,确保施工方案的精准实施。

#### 参考文献:

- [1] 宋斌. BIM 技术在高大模板工程中的应用研究[D].南京:东南大学,2016.
- [2] 黄奇荣,武俊,刘曦,等. BIM 技术在高大模板施工中的应用[J].施工技术,2017,46(增刊2):621-624.
- [3] 谢晖. 基于 BIM 技术的四维可视化动态施工模拟应用[J].山东农业大学学报(自然科学版),2018,49(5):825-827.
- [4] 徐鹏飞,李晋,孙继东. 基于 BIM 技术的装配式建筑施工全过程研究和应用[J].建筑结构,2020,50(增刊):654-657.
- [5] 穆文奇,徐炜,南芳兰,等. BIM 技术在模板脚手架工程施工精细化管理中的应用研究[J].施工技术,2017,46(6):12-14.
- [6] 王婷,池文婷. BIM 技术在 4D 施工进度模拟的应用探讨[J].图学学报,2015,36(2):306-311.
- [7] 蓝磊. 基于 BIM 的施工现场质量安全动态管理[J].建筑科学,2021,37(3):157.
- [8] 王胜杰,贾博勋,鲁鹏,等. 盘扣式脚手架支撑体系在高大模板工程中的应用[J].建筑技术开发,2021,48(15):84-85.

收稿日期:2022-03-22

(上接第 146 页)

结合 3# 桥台的施工经验,为避免桩基施工引起周边建筑物沉降,0# 桥台剩余桩基施工前进行地质补钻及 CT 探测,根据探测结果对桥头范围土体进行预加固处理。

#### 3 结语

市政桥梁由于建设条件限制,桥位选择受限,桥梁桩位难以避开地质复杂区域,桩基施工影响因素多、难度大,桩基施工前应加强勘察,必要时采取预加固措施,避免发生桩基施工安全事故。本文结合广州某市政桥梁在岩溶+流砂地区桩基施工中桥头沉陷案例,根据地质情况和沉陷原因提出解决方法,保证施工安全。

#### 参考文献:

- [1] 广东省长大公路工程有限公司. 岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南:GDJTG/T A01—2016[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [2] 蒋国龙. 岩溶区桥梁桩基施工技术与设计方法研究[J]. 工程技术研究,2021(7):229-230.
- [3] 张安安. 桥梁桩基穿越 6~10 m 厚度流砂层施工技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2018,31(增刊2):160-161.
- [4] 许韬. 弹性波 CT 在岩溶区桥梁桩基勘察中的应用[J]. 城市道桥与防洪,2021(11):206-208+211.
- [5] 王如寒. 岩溶地区中小跨径桥梁下部结构设计新思路[J]. 城市道桥与防洪,2021(9):89-91+15.

收稿日期:2022-09-30