

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.022

引用格式:李达.城市高架桥桩基工程溶洞处理技术应用探讨[J].公路与汽运,2024,40(5):124-128.

Citation:LI Da.Discussion on the application of karst cave treatment technology in pile foundation engineering of urban elevated bridge[J].Highways & Automotive Applications,2024,40(5):124-128.

城市高架桥桩基工程溶洞处理技术应用探讨

李达

(广州公路工程集团有限公司, 广东 广州 510075)

摘要:广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路广州段位于岩溶发育区,地下水系丰富,且分布许多溶洞与裂隙,这些溶洞和裂隙的位置及大小不确定且无规律,表面覆盖层厚度各有差异且强度不尽相同。该路段上跨现有市区公路,需保证施工过程的安全和现有交通的运行安全,基础施工相当困难且危险系数极高。文中针对不同情况进行分级处理,采取组合措施处理溶洞,提炼出一套适用于城市高架桥桩基工程的溶洞处理工艺。

关键词:桥梁;城市高架桥;桩基;溶洞处理

中图分类号:U443.16

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0124-05

桥梁施工中,岩溶是一种常见不良地质,其地质情况复杂,桩基施工尤为困难^[1],是影响工程质量和安全的重大隐患。溶洞区桩基施工中,冲孔经过溶洞区时可能因隐藏的溶洞或石灰岩裂缝引发漏浆。由于溶洞上方直接覆盖的是具有良好渗透性的细砂层,一旦溶洞顶部的岩石结构被破坏,且溶洞之间形成连接并扩大到足够体量,孔内泥浆将快速流失,从而使孔壁失衡,泥浆流失也会冲带细砂层,最终导致坍塌,甚至可能引起地面下沉。因此,在溶洞区进行桩基施工前,必须充分掌握岩溶的发育规律、形态特征及分布情况,并因地制宜地采取处理措施,确保施工安全。

1 工程概况

广州市白云区广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路广州段在鸦岗大道上高架(见图1)。该地区覆盖层主要为冲洪积黏性土、砂土层,厚度不均;表层主要是软土;底部包括石炭系灰岩、碳质灰岩、碳化页岩、砂岩、碳化砂岩及页岩等风化层。覆盖层中的软土层及基底灰岩区发育溶洞是该工程的主要工程地质问题。

2 工程勘察

2.1 勘察措施

在桩基施工中,由于复杂的岩溶地质,常会出现

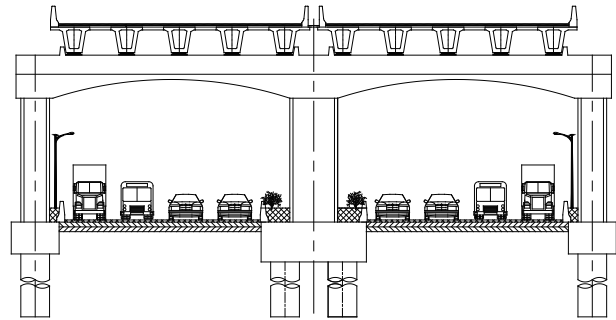


图1 鸦岗大道高架桥标准横断面

漏浆、塌孔等状况,可能导致严重的经济损失和社会负面效应^[2]。需合理运用各种勘探手段探明溶洞大小、形状及深浅程度等,制定相应处理方案^[3]。

对位于岩溶发育区的桩基,应逐桩勘探^[4-8]。由于岩溶发展的非规律性和局部位置上岩石变化显著,岩溶分布极其复杂,需采取多项措施对岩溶桩基进行勘察:

(1) 在补勘阶段,采用逐桩钻探和管波检测的方法,并对岩溶发育且溶洞分布有显著差异的桩位适量增加勘钻数量。

(2) 采取增补钻孔的方式也无法明确岩溶发育非常复杂地区中溶洞分布情况时,使用综合地质钻探和CT检测手段推断周围溶洞或软弱夹层的形成状况。

(3) 对于单个洞穴高度超过5 m,串联的溶洞总高度超过8 m,且顶板厚度较薄、上面覆盖砂土层

的桩位,进行 CT 探测,了解桩位周围重要地面道路、桥梁、房屋等建筑物的地下溶洞分布情况。

2.2 岩溶发育程度等级划分

主要以遇洞率和线岩溶率评价岩溶发育程度,评价标准见表 1。

表 1 岩溶发育程度评价标准 单位: %

遇洞率	线岩溶率	岩溶发育程度
<10	<5	弱
≥10~30	≥5~10	中等
≥30~60	≥10~30	强
>60	>30	极强

岩溶在该项目整个线路中广泛存在。根据勘测结果,这些岩溶通常以串珠形式出现,其深浅程度各异,最高可达 22.2 m,体积有大有小;一般为填充状态,少数溶洞为无填充或半填充状态;遇洞率为 27%,岩溶发育程度为中等;线岩溶率为 0.4%~74.0%,岩溶发育程度为弱~极强。根据隐伏岩溶分布规模、分布特征及岩溶发育等级,各岩溶发育等级累计长度及占比见表 2。

表 2 岩溶发育等级统计 单位: %

岩溶发育等级	占比	岩溶发育等级	占比
岩溶弱发育区	37.80	岩溶强发育区	27.55
岩溶中等发育区	7.10	岩溶极强发育区	27.55

3 溶洞处理原则及安全等级分类

3.1 处理原则

岩溶区桩基施工的投入比非岩溶区桩基施工大很多,主要是为了保证安全和质量。安全包含结构安全和施工期间安全,质量即为结构自身质量。为达到安全、质量要求,需做到以下几点:

(1) 保证地面稳定。地面稳定方能保证施工期间人员、机械等安全,才能保证结构设计、计算的边界条件,结构安全才有保证。存在砂土层、软土层等不良地质或溶洞水平向尺寸较大时,容易形成地面坍塌,应采取硬化地面(针对浅层不良地质情况)、对覆盖层进行处治(如打设钢护筒、帷幕注浆等)、对水平向尺寸较大的溶洞进行预处理等措施。施工过程中地面的稳定性会受到淤泥质粉状黏土层和砂土层的威胁,为确保软弱覆盖层稳定、安全,采取钢护筒支护方式,避免在洞顶板被打穿或浆液泄漏时引发

地面塌陷。

(2) 保证溶洞段护壁稳定。溶洞段护壁稳定才能保证不漏浆、少漏浆,也是地面稳定的控制因素之一。灌注桩基混凝土时,护壁稳定才能保证桩基混凝土质量,确保结构安全。保证溶洞段护壁稳定的措施较多,需根据地质、地貌、地物、施工能力等具体分析,主要手段包括抛填片石+黏土、溶洞预灌浆封闭及钢护筒穿越。

(3) 保证现有结构物安全。保证现有结构物安全,除采取常规地质情况下桩基施工措施外,还要结合现有结构物的重要性适当提高溶洞处理力度。考虑到该项目地处市区,邻近建筑物包括市政道路、地面桥梁和各类管线等,对变形和稳定性的要求较高,需增强对溶洞的处理力度。

3.2 岩溶及桩基安全性评价等级划分

3.2.1 区域危险等级划分

根据岩溶路段桥梁基础施工可能引发的事故严重程度,将建设区域划分为高危险区域、中危险区域和低危险区域。其中:高危险区域为与重要结构物交叉或并行的路段,其若发生事故将造成极其严重的影响;中危险区域为重要构造物邻近的区域,其发生事故将造成比较严重的影响;高、中危险等级以外的其他区域为低危险区域,其发生事故造成的影响一般。

3.2.2 施工风险等级划分

依据现场地质状况对施工风险进行分级,划分为高风险、中风险和低风险 3 个等级。

(1) 符合高风险等级的桩基如下:1) 溶洞高度≥5 m,且内部无填充物或填充物呈软(流)塑状;存在串珠状溶洞,其顶部高度≤1 m,且溶洞内无填充物或填充物呈软(流)塑状;桩位存在地下河或地下水流或溶洞与旧桥及附近地质钻孔相互通联。2) 桩位覆盖层存在土洞;桩位软弱层较厚,如砂质、泥沙等。

(2) 符合中风险等级的桩基如下:桩位上有单个或串珠状溶洞,但内部填充物呈可塑或硬塑状;桩位有软弱层,如砂土层、淤泥层等。

(3) 符合低风险等级的桩基如下:桩位没有溶洞;桩位不存在软弱层。

3.2.3 桩基安全等级划分

综合考虑危险区域和施工风险级别,将桩基安全状况划分为 3 个等级(见表 3)。

表 3 桩基安全等级划分

施工风险等级	不同区域危险等级下桩基安全等级		
	高风险区域	中风险区域	低风险区域
高风险等级	1 级	1 级	2 级
中风险等级	2 级	2 级	3 级
低风险等级	2 级	3 级	3 级

4 岩溶处治方案及施工工艺

4.1 岩溶处治方案

溶洞处理包括对覆盖层的预处理和对溶洞的处理两方面。

4.1.1 安全等级为 1 级的桩基

(1) 覆盖层的处理。通过预注浆对土洞进行处理;采用钢护筒支护覆盖层至岩面,下沉钢护筒采用引孔跟进方式;如覆盖层中砂土层较厚,无法跟进安装钢护筒,采用钢护筒+深层预注浆进行处理。

(2) 溶洞的处理。溶洞高度 $H < 3$ m 时,采取抛填片石+黏土的处理方式。 $3 \text{ m} \leq H < 5$ m 时,若溶洞内为无填充或半填充或虽为全填充但填充物呈软(流)塑状,采用预注浆充填处理;若溶洞内为全填充且填充物呈可塑状,采取抛填片石+黏土的处理措施。 $H \geq 5$ m 时,若溶洞内为无填充或半填充或虽为全填充但填充物呈软(流)塑状,采用预注浆充填处理,溶洞为多层串珠状且高度较大、充填情况较差时,采用双层钢护筒处理;若溶洞内为全填充且填充物呈可塑状,采取抛填片石+黏土的处理措施。

4.1.2 安全等级为 2 级的桩基

(1) 覆盖层的处理。通过预注浆对土洞进行处理;采用钢护筒支护覆盖层,钢护筒穿越软弱层至不透水层 2 m 以上,下沉钢护筒采用引孔跟进方式;若钢护筒跟进困难,采用浅层跟进钢护筒、深层预注浆的处理方法。

(2) 溶洞的处理。溶洞高度 $H < 3$ m 时,采取抛填片石+黏土的处理措施。 $3 \text{ m} \leq H < 5$ m 时,若溶洞内为无填充或半填充或虽为全填充但填充物呈软(流)塑状,采用预注浆充填处理;若溶洞内为全填充且填充物呈可塑状,采取抛填片石+黏土的处理措施。 $H \geq 5$ m 时,若溶洞内为无填充或半填充或虽为全填充但填充物呈软(流)塑状,采用预注浆充填处理;若溶洞内为全填充且填充物呈可塑状,采取抛填片石+黏土的处理措施。

4.1.3 安全等级为 3 级的桩基

(1) 覆盖层的处理。按常规施工方法设置护筒。

(2) 溶洞的处理。如遇到突发状况出现漏浆,采取抛填片石+黏土的处理措施。

4.2 主要施工工艺

4.2.1 预注浆

在插入钢护筒和钻进桩基之前,采用套管注浆工艺充填溶(土)洞,以保证顺利穿越溶(土)洞,提高工程的安全性和有效性。套管注浆工艺流程为测量放样→钻孔设备就位→钻孔(钢套管跟进)→安装注浆管→自下而上注浆→注浆结束,拆除钢套管→移位。

(1) 钻孔。在以桩中为原点、桩径 $D+1$ m 为直径的圆上均匀布设注浆孔($D \leq 2$ m 时布设 6 个注浆孔, $D > 2$ m 时布设 8 个注浆孔),孔深为洞底标高以下 0.5~1.0 m,如果情况特殊,可根据实际情况增大深度。

(2) 注浆。注浆区域为从目标溶(土)洞底板下方 0.5 m 到顶板上方 0.5 m。为防止各注浆孔相互串浆,影响注浆效果,在前一钻孔完成注浆后再进行下一孔施工。注浆主要参数如下:土洞注浆初始压力为 0.0~0.2 MPa,稳定压力为 0.5~0.6 MPa,最大注浆压力为 1.0 MPa;溶洞注浆初始压力为 0.0~0.2 MPa,稳定压力为 1.0 MPa,最大注浆压力为 2.0 MPa;水灰比为 0.6~1.0;水玻璃掺量为 5%;注浆压力达到终压标准时,稳定该压力不少于 10 min,注浆量不大于 5 L/min。

(3) 检查孔。采取抽检的方式,加强对前期工艺不稳定阶段或重点部位的抽查。每根桩基设置 3 个检查孔,其深度超过注浆钻孔的 0.5 m,检查孔布置见图 2。注浆 48 h 后,通过检查孔检查注浆的填充状况。如果发现存在空洞区域,利用检查孔进行二次注浆,直到溶洞填充密实。

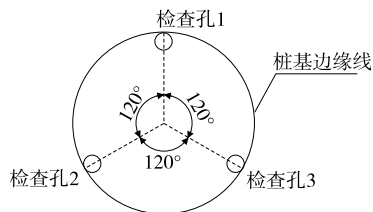


图 2 检查钻孔的布置

(4) 注浆注意事项。1) 钻注浆孔的过程中,跟进钢套管施工,以稳定护壁,防止塌孔。2) 对处于

砂土层的土洞或浅层溶洞,采用密度较高的水泥浆,以减少对砂土层的扰动。3) 对有填充的溶洞可直接注浆,充填物较少且空腔较大时,可先填入部分粗骨料,再进行注浆,以减少注浆量。4) 岩溶缝隙较大且有浆液大量漏失时,可在浆液中掺入水玻璃,并加大浆液密度或采取间歇性注浆方式。

4.2.2 钢护筒跟进

不同桩径下钢护筒直径及壁厚设置见表 4。根据加工、运输及安装等工序要求,分段预制钢护筒,现场拼装,其长度应保证钢护筒穿越软弱覆盖层以下 2~3 m 或落在基岩面。工艺流程为地表处理→埋设外层钢护筒→开钻引孔→下放首节护筒→固定首节钢护筒→继续引孔→焊接并下放第二节钢护筒→重复上述过程直至钢护筒下放到设计标高→正常钻孔→成桩。

表 4 不同桩径下钢护筒直径及壁厚

桩径/m	钢护筒直径	钢护筒长度/m	钢护筒壁厚/mm
		<10	8
≤1.6	桩径+20 cm	≥10~20	10
		≥20	12
		<10	10
>1.6~2.0	桩径+30 cm	≥10~20	12
		≥20	14
		<10	12
>2.0~2.5	桩径+30 cm	≥10~20	16
		≥20	20
		<10	16
>2.5	桩径+30 cm	≥10~20	18
		≥20	20

(1) 钢护筒加工。钢板下料长度为钢护筒周长,宽度为 1.5 m,利用卷板机加工成筒,再将卷完的钢板两端对齐并焊接。为防止钢护筒焊缝在施打过程中产生裂缝,采用双面焊。将加工完成的钢护筒每 6 节拼接成一根,长度为 9 m,以方便运输。护筒刃脚处粘贴钢板以增强其强度,贴补钢板的高度为 0.5 m、厚度为 10 mm。护筒底口上 3 m 位置及钢护筒顶端同样采取钢板补强措施,钢板高度为 0.3 m、厚度为 10 mm,以提高强度,保障振动插打中钢护筒不变形。

(2) 采用吊车配合振动锤施打钢护筒,将锤的

开口调整到适合钢护筒大小,夹紧钢护筒进行施打。钢护筒拼接方法为将钢护筒吊起,与已振入的钢护筒进行对接焊,并粘贴钢板加固。

(3) 施工注意事项。1) 采用边引孔边下放钢护筒的施工工艺,在钢护筒跟进过程中,根据施工工序调整锤头直径:首节钢护筒下放前,引孔锤头采用比钢护筒直径大 5 cm 的冲锤;首节钢护筒下放后,引孔锤头采用比钢护筒直径小 5 cm 的冲锤;完成钢护筒施工后,采用不小于设计桩径的锤头继续钻进,直至达到设计标高,终孔。2) 钢护筒焊接拼装时,严格控制其顺直度,不得折曲;保证钢护筒口定位准确,并采取固定措施,防止施工扰动造成偏移;钢护筒底口贴补钢板,以加强刃脚,避免出现卷刃现象;考虑到基岩面不平整,钢护筒与基岩面之间局部存在间隙,严格控制钢护筒埋深并加强护筒刃脚以防变形,护筒安装至设计标高后反复回填黏土、片石并冲压密实,填充护筒底与基岩面的空隙,以免护筒底口掏空漏浆。

4.2.3 抛填片石、黏土

采用片石、黏土等材料填充溶洞,增强溶洞的稳定性,降低施工风险。该方法适用于安全级别为 3 级的桩基或与其他措施联合处理的高风险等级桩基。

抛填材料一般为 1:1 片石、黏土混合料,片石直径为 15~20 cm。现场应预备充足的片石、黏土及泥浆等物资,以便应急处治^[9-10]。

遇到溶洞时,及时补充泥浆,使孔内浆面维持在正常高度,并抛填片石、黏土至洞顶至少 2 m,回填后采用 0.5~0.8 m 冲程提吊桩锤冲击挤密溶洞,反复多次回填、冲击直至形成稳定护壁。施工过程中确保钢护筒固定,防止漏浆导致护壁失稳、孔口塌陷。

在邻近溶洞顶板 1 m 处,调高孔内泥浆密度,采用小冲程(≤1 m)冲孔,缓慢破顶,避免掉锤、卡锤。另外,实时监测孔内泥浆高度,若泥浆水位下降,立刻提升桩锤并补充泥浆、抛填片石+黏土,待泥浆水位恢复稳定后,用小冲程冲击填料,挤密溶洞,形成护壁。若溶洞较大,多次回填、冲击成孔。

出现漏浆时,立即补充泥浆并组织回填,先抛填片石这类体积及密度都较大的材料,回填高度以能稳住浆面不再渗漏为宜。正常地质段钻孔中出现漏浆,大多是由与周边溶洞连通或周边溶洞被挤破所致,可采取补充泥浆、抛填片石+黏土的处理措施。

遇到较大土洞或空溶洞及串联溶洞时,采取轻度冲击、缓慢推进的处理方式。

5 成桩质量

根据第三方检测报告,广佛肇高速公路广州段 SG02 标段的成桩质量见表 5, I 类桩占比超过 90%,施工质量满足规范及设计要求。

表 5 桩基质量检测结果

桩基类别	数量/根	占比/%
I 类桩	418	90.5
II 类桩	44	9.5
不评定桩	0	0.0

6 结语

在广佛肇高速公路广州段桩基工程溶洞处理中,根据施工区域及施工风险对桩基进行等级划分,针对不同等级桩基分别采取预注浆、钢护筒跟进、抛填片石+黏土的处理措施,分类别对覆盖层及溶洞进行治理,提高了施工效率,保障了施工安全及成孔质量,可为类似工程施工提供借鉴。

参考文献:

- [1] 尹国荣.岩溶区勘察方法及桥梁桩基施工技术[D].长沙:中南大学,2009.
- [2] 谢和平,马细勇.岩溶复杂地质条件下的公路桥梁桩基施工技术探究[J].工程技术研究,2019,4(18):92-93.
- [3] 兰立刚.高速公路桥梁溶洞桩基施工技术探讨[J].科技与创新,2016(2):150-151.
- [4] 李建奎,王林,吴满,等.多层串联溶洞地带桩基成孔质量提升[J].交通世界(上旬刊),2018(11):100-101.
- [5] 彭李立.岩溶+流砂地质市政桥梁桥头沉陷处理方案研究[J].公路与汽运,2023(5):144-146+150.
- [6] 刘逸飞,王琛.岩溶区桥梁桩基水平承载特性及影响因素分析[J].公路与汽运,2022(6):104-108.
- [7] 胡超.湘府路高架桥桩基沉降计算及影响因素分析[J].交通科学与工程,2020,36(2):98-103.
- [8] 郝大为,刘华江,吴亚超,等.岩溶地区桥梁桩基设计计算方法分析[J].市政技术,2023,41(6):64-68.
- [9] 蒋国龙.岩溶区桥梁桩基施工技术 & 设计方法研究[J].工程技术研究,2021,6(7):229-230.
- [10] 谭翠前.岩溶地区桥梁基础处理方案研究[J].科技创新,2023(14):153-156.

收稿日期:2023-08-21

(上接第 99 页)

- [12] 徐华.半刚性基层沥青混凝土路面反射裂缝扩展和疲劳寿命研究[D].南宁:广西大学,2012.
- [13] YIN A Y, YANG X H, YANG Z J. 2D and 3D fracture modeling of asphalt mixture with randomly distributed aggregates and embedded cohesive cracks[J]. Procedia IUTAM, 2013, 6: 114-122.
- [14] LIU L, CHEN H S, SUN W, et al. Microstructure-based modeling of the diffusivity of cement paste with micro-cracks[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 1107-1116.
- [15] TANG S B, TANG C A. Crack propagation and coalescence in quasi-brittle materials at high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 134: 404-432.
- [16] 郭江.基于材料细观界面特征的沥青混凝土试件开裂过程数值模拟[D].南京:东南大学,2015.
- [17] 张建伟. ABAQUS 6.12 有限元分析从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [18] 苏项庭.基于粘结裂缝模型的非均匀准脆性材料断裂模拟研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [19] 交通运输部公路科学研究院.公路路面基层施工技术细则:JTG/T F20—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [20] 陈光,刘翠,于仲慧.基于内聚力模型的水稳填充大粒径碎石基层材料抗裂机理分析[J].公路,2023,68(4):364-369.
- [21] 李明,李昶,刘继华,等.粗集料及界面特性对水泥稳定碎石温缩抗裂性能影响性分析[J].公路,2019,64(10):1-7.

收稿日期:2023-10-25