

岩溶地区勘察与桩基设计要点

方开敏

合肥工业大学设计院(集团)有限公司

摘要:工程实际中岩溶发育地区地质情况具有许多不确定因素,岩体强度及承载力因岩溶而弱化,对施工于其上的建筑物构成了严重威胁。本文从岩溶地区地质勘察需求,桩基础形式确定,桩基持力层选择,溶洞稳定分析,溶洞治理方法进行分析,对岩溶地区勘察和桩基设计要点进行总结,重点介绍了溶洞稳定性的定性分析和定量分析方法。由工程实例引出桩型选择的基本思想,当桩体端头以下3倍桩径和5m深以内有溶洞,采用近似法计算,达到溶洞稳定要求后可不处理溶洞。

关键词:岩溶;桩基;稳定

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.11.028

岩溶是水溶性岩石(如石灰岩等)受水溶蚀后地下岩层所形成的溶沟,溶洞和裂隙等地质形态与现象的统称,国外称Karst(喀斯特)。岩溶地质存在于我国的许多地区,以云南东部,贵州和广西为多。工程实际中岩体强度及承载力受岩溶影响而弱化,对施工于其上的建筑物构成了严重威胁。介绍了竣工后建筑物出现不均匀沉降现象,经调查认定为勘察时未能正确暴露现场溶洞为主要原因,而设计中没有充分考虑溶洞对建筑物的影响。由于现场溶洞分布及性状具有不确定性与复杂性,目前工程上最常用的是桩基法通过。针对岩溶地区桩基工程中存在的问题进行了分析,得出岩溶地区桩基嵌岩深度不应单纯按照规范的最小值来确定,应根据试桩及勘察成果来确定;施工勘察为桩端持力层确定提供了可靠的基础,应在项目实施前进行施工。本文从工程地质勘察的要求,桩的选择,持力层的选择,溶洞稳定分析及溶洞的处理入手,对岩溶地区桩的设计要点进行总结,结合工程实例进行分析,其结果对岩溶地区桩基设计具有一定借鉴意义。

一、岩溶区桩基地质勘察技术

(一) 钻探技术

钻探技术目前在岩溶地区桥梁桩基地质勘察中应用最为广泛,该技术基本不会受到地质的影响,精确度高。利用这一技术进行岩溶地区勘测时,勘测设计人员要根据钻探的标准,工艺和目的,协调和规范勘测过程,并将钻探的变化实时地记录下来,为之后的建设打下基础。

(二) 地球物理勘探技术

利用专业勘察仪器探测岩溶地区各种地质分布规律,获取勘察数据信息的技术,这一技术就是地球物理勘探技术。地球物理勘探技术包括地震勘探法,放射性勘探法,声波测量法,直流电法和交流电法,尽管它们具有获得的资料信息量大,操作方便和适应性强的特点、涉及面广,使用效率较高,但该技术很容易受到其他因素干扰而造成对勘探结果的影响,所以在进行勘探

时,勘察设计人员要立足于岩溶实际地质,通过分析勘探数据,使得勘探结果精度进一步提升。

(三) 高密度电法

高密度电法基本上应该是根据岩土体中电性差异来探测地质。目前的高密度电法观测系统包括先进的电法处理软件,多路电极转换器和多功能数字激电仪,用于高密度电法勘探时,勘察设计人员首先要在这一地区施加电场得到电阻值以实现地质分析。

(四) 静力触探与遥感技术

岩溶地区地质勘探时,静力触探不仅能分析出该区的有无隐蔽土洞,而且能根据已有数据资料分析隐蔽土洞的方位,应用较为频繁。基于此,采用遥感技术调查岩溶地区的地质时,可通过电磁辐射来调查地下深层的信息并传输至地表,这种勘察方式能够让勘察的效率得到进一步的提升,这种检测方式多应用在裸露性岩溶的区域中。遥感技术具有真实性强的特点,能够对岩溶地区地质有一个直观的体现,所以通过利用遥感技术对其进行调查,能够对其地质状况和地势地貌有一个了解,从而为后续桥梁桩基的建设打下一个基础。

二、岩溶地区工程地质勘察

在岩溶地区基础设计中,人们常常希望勘察报告能够详细地勾画出现场整体溶洞情况和查明岩溶发育规律,而这在现实中是难以实现的,在采用适当溶洞处理措施时,对于一般工程来说也是没有必要的。地质钻探中,因钻孔直径较小,所能体现的空间范围受到限制,钻探将其描述成溶洞后实际上可能就是裂隙和溶槽,真实情况存在着一些不确定因素。在岩溶地区勘察时,推荐物探与钻探联合使用,2种探测手段互相印证,以提高岩溶探测效率与精度。因溶洞平面及竖向分布复杂且不确定,需按设计阶段逐步调查,初设调查宜采用钻探,重点把握场地地质及岩溶基本信息;详细阶段调查采用钻探与物探结合的方法定性查明溶洞空间分布形态与充填物情况,并对溶洞成因与发展趋势进行了评价。实际工作中因勘探孔距大、岩溶分布存在诸多不确定性等原因,在详勘阶段无法全面查清岩溶形态,所以在施工阶段要进行补充调查,着重查清桩端以下的溶洞状况。主要是钻探,并对以往物探结果作了必要核实,以便为工程桩施工提供最终孔口条件。

三、桩基设计重点

(一) 桩基选型

岩溶地区桩基形式应视结构类型,荷载大小和岩溶情况而定,并以安全和经济为前提。综合考虑场地施工情况、基岩表面坡度尺寸、地下水情况以及基岩上覆土层厚情况,岩溶地区桩基形式以钻(冲)孔式灌注桩、人工挖孔桩及预制桩为主;在地下水量小,工程桩机械难以达到,基岩埋深较浅,溶洞埋深较大的情况下,人

工挖孔桩较为合适；在地下水充足，工程桩的机械容易达到，或者需要通过较硬岩的情况下，钻孔灌注桩是合适的。在基岩埋深大，基岩面起伏坡度较小的情况下，预制桩是适宜的。

（二）持力层的选择

在覆土层厚度和基岩起伏面都比较大的情况下，嵌岩桩的桩长差异性较大给施工带来了一定的难度，这时要尽量避免把桩的一端直接放置在基岩中，可以使用非嵌岩桩，采用上覆土层作为持力层时，承载力需要较高时桩数的适当提高。

在岩层埋藏浅或者承载力要求高须嵌岩的情况下，采用基岩层为基桩持力层。如果桩端下3倍桩径和5m深的范围没有溶洞，则可以直接采用岩层做基桩持力层；桩侧摩阻力比大于50%的，可以适当降低无溶洞基岩的厚度，但桩径和4m不得小于2.5倍。在溶洞顶板未达到上述要求的情况下，应在桩端的下方有足够厚的岩层存在，应是串珠状溶洞，可以将溶洞灌实后做持力层。

对嵌岩桩而言，嵌岩深度主要影响单桩承载力，应视上部结构荷载，土层厚度及基岩完整性而定，对嵌岩完整性良好且较高强度的硬质岩体，其最小埋深不宜低于0.5D，0.5米为大值，在嵌岩为强风化及全风化岩体时，应适当增加嵌岩深度，推荐嵌岩深度不宜低于1.5D，1米为大值。

（三）桩基承载力的预估

在设计中，桩基承载力可以按照《建筑桩基技术规范》（JGJ 94-2008）中的规定来估算。对非嵌岩桩可用5.3.8预估，对嵌岩桩可用5.3.9预估岩石的单轴抗压强度。利用单桩静载试验测定了单桩竖向承载力的特征值，设计所用特征值应扣去溶洞中充填物桩身侧阻力，对洞顶基岩引起的桩身侧阻力应适当折去。

（四）溶洞稳定性分析

溶洞稳定性要求详见《岩溶地区建筑地基基础技术标准》、（GBT51238-2018）等，在满足第5.3.5第六条要求的情况下，不考虑岩溶对地基稳定性产生的影响。

在不满足以上条件的情况下，应对溶洞的稳定性进行分析。

（五）溶洞治理

溶洞的出现为桩基工程施工带来了诸多难题，主要表现为桩孔浇灌过程中混凝土渗漏，钻机作业过程中出现卡钻或者掉钻现象，影响了桩基质量及施工进度，可以采取如下措施对其进行治理。

1. 浅层溶洞的治理方法

（1）钢护筒跟进法为浅层溶洞治理的主要手段。钢护筒后续跟进方式适合高超过2m而未填充致密溶洞或串珠状溶洞。该方法具有剪性强，成桩质量相对较好的特点。

（2）对于较浅层岩溶土洞，可用挖除法进行治理。开挖完成后，挖去空洞内填充的松软土体，然后用碎石，砂砾和素土填充夯实，最后进行后续的施工。

（3）深部溶洞的治理办法

深部溶洞可先行充填处理溶洞，如用高压喷射注浆

法或低标号混凝土灌流后冲孔施工等，最后通过溶洞。

（六）对桥梁基础形式进行了合理的选择

1. 摩擦桩等

在岩溶地区桥梁工程施工时，因这一地区的地质条件比较特殊，一般采用群桩或者单排桩地基。溶洞上覆土层比较薄时，因其提供摩擦力比较小，又有顶板厚度不大，溶洞分布浅等特点，故不能采用嵌岩桩施工。为确保桥梁基础稳定，桥梁桩基要从穿越溶洞群开始。设计桥梁桩基时，勘察设计人员要根据岩石抗剪强度和试桩结果来优化摩擦桩结构，控制桩身混凝土和周围岩石的黏结性。在桥梁工程建设场地土层较厚，土层下方串珠状溶洞较深的情况下，勘察设计人员可采用群桩摩擦桩，这时桩基础不需要穿越溶洞。

2. 嵌岩桩等

单排桩与群桩。对于桥梁工程的建设，如果其具有桩基宽度大，孔径偏差大以及相同墩台地基情况相同的特点，则可选用群桩与单排桩两种结构设计方式。该情况下单桩的轴向横向稳定性和轴向受压容许承载力都比较大，满足桥梁结构规范及标准的要求。

独柱单桩。独柱单桩桩基多用于宽度以下，孔径较小的桥梁工程建设中。同时，对于桥梁工程的建设而言，若墩位下部的溶洞具有分布密，范围广，溶洞埋深大以及岩性完整性好等特点，勘察设计人员应当选用独柱单桩桩基。

（七）采取扩大基础与桩基础相结合

对于多数桥梁工程来说，在其施工操作中多数桥墩都能够将基础进行加宽，但是在具体建设中，有些基础岩石支撑面位于岩溶区域内，可能使施工处理遇到一些困难，工程人员要对溶洞进行妥善处理才能促使基础结构达到目的。例如施工人员对某一桥墩进行开挖操作时发现溶洞内充填有上游泥沙，碎石子，要采用具体长度及强度钻孔桩进行施工操作，这时桩基上部同扩大基础进行有效的连接，在溶槽区域内加固钢筋及主钢筋后就构成了联合基础。

（八）桩基负摩擦力作用

若地基土石在某些外力的作用下可能发生显著的沉降，特别是在地下水被大量开采的情况下，地基土石的沉降趋势会更加显著，并且随着这种沉降现象的发生，还会同步生成阻碍桩基移动的力，这种力即为负摩擦力，这种力一旦长时间不进行治理，桩基很难维持稳定，从而加重桥梁工程结构安全风险。所以，为了解决这一难题，工程人员应该在中性点区域采用钢套管控制这两种物质之间的接触，以削弱它们对桩基的负面影响。

四、工程应用

（一）工程概况等

建筑场地抗震设防烈度为6度，地震基本加速度为0.05g，地震分组为第一组，场地类别为II类，建筑平面为24.25m×28.75m，地上26层，地下2层，建筑功能为住宅，建筑高度为76.2m。

（二）工程地质

现场揭露地基土以第四系植物层为主：即耕土和黏土，粉质黏土和白云质灰岩。各土层的性质，分布和厚度见下：

一层耕土，是在褐灰色黏性土中混入少量植物根系，结构疏松的土壤。厚度通常在0.30-0.60米之间，在全场地表部均有。

两层黏土：硬塑性状态下，干强度和韧性适中。部分地段夹薄层粉质黏土分布于全场，厚度0.7~11.7m。

二一层黏土：处于可塑状态，部分夹有薄层软塑，干强度和韧性适中。局部区域夹薄层粉质黏土分布于场地的大部分区域，厚度为0.50~5.70m。

二层粉质黏土：可塑状态、干强度和韧性一般，分布于现场局部地段，厚度0.60~4.60m。

三层黏土：硬塑性状态，部分可塑状态，干强度和韧性适中，部分区段夹有薄层粉质黏土和少量碎石，在现场多数区段均有分布，层厚在0.50~5.70米之间。

4白云质灰岩（单元层代号）：风化程度中等，饱和单轴抗压强度的标准值30MPa左右节理裂隙较为发育，岩芯为10cm左右的土柱状裂隙，有的为4~7cm的碎块状裂隙，采取率40%~80%、RQD=20%~80%。

场址处于碳酸盐岩区，这是岩溶发育的基本条件，其易溶化学成分及矿物成分多，岩溶发育程度强，场址不良地质以岩溶为主。据钻探结果显示钻孔遇洞率在5.0%左右，岩溶发育程度微发育。

（三）基础选型

从地勘报告中得知，现场没有揭露厅堂式溶洞，钻孔中见到溶洞的孔数也很少（遇洞率大约在5%左右）；局部地点补勘表明，洞顶基岩最薄，达1.9米，基岩面波动不大，平均波动坡度在5%左右，洞顶覆盖层属于良好黏性土，能提供很大侧摩阻力，平均厚7米，第四层属于桩端持力层，岩体属于坚硬岩石，岩体工程特征良好。由于该建筑物属于高层建筑，承载力要求较高，一般天然地基不能满足要求，鉴于溶洞存在的不确定因素，最后采用了整体桩筏基础来增强地基的整体稳定性。比较人工挖孔桩，冲孔灌注桩和预制管桩的各自特点，因岩面土层厚度大，基岩起伏小，而更兼顾管桩施工快捷，成本低廉，有成桩条件的优点，桩基选用静压预应力高强度预制管桩，直径 Φ 500，有效桩长平均7米。为充分发挥基岩承载力，增加岩面桩稳定性，必须增加嵌岩深度，可以采用增加压力，增加管桩壁厚等方法增加嵌岩深度。为了避免溶洞顶应力集中，在设计中增大了桩间距，单桩承载力特征值取2200kN，桩端持力层取第三层，筏板厚度取1500mm。据以往工程经验，因预制管桩不能直穿溶洞，属岩面桩，为增强预应力管桩嵌岩及受力可靠性，并适当增加承载力安全储备，采用了在桩体端部增设十字板钢桩尖，以增强桩体进入持力层穿透能力等技术措施。

（四）溶洞处理

据岩土勘察报告得知，受桩下溶洞影响，顶板灰岩最厚处为1.9米，未达到超过5米，因此需要进行溶洞稳定性验算。经施工勘察，溶洞平面尺寸在2×3m左右，

根据结构力学近似算法，其计算结果如下。

$$\text{顶板所受的总荷载} = [2250 + 23(179 + 1.925)] / (23) = 575.5 \text{ kN/m}^2$$

弯矩 $M = 575.532 / 8 = 647.4 \text{ kNm}$ ， σ 取为抗压强度的1/8，即为3.725MPa，S取为抗压强度的1/12，即为2.48MPa，V为863.25kN，b取为1m，溶洞顶板厚度超过1.2m后达到稳定性要求，该工程灰岩的最小厚度是1.9m，因此该现场不需要对桩端以下溶洞进行治理。

（五）工程效果

工程桩建成后，利用超声波透射法对桩基质量进行了测试，并通过静载试验对桩基竖向承载力进行了测试，测试结果表明抽检桩基承载力及桩基质量性均满足设计要求，因此桩基承载力是稳定可靠的，设计措施是安全、有效的。目前已交付使用超过5年，建筑整体沉降不超过20mm，未出现其他异常情况，故桩基安全、可靠，溶洞处理措施适当、有效。与旋挖桩基础方案相比，经施工单位估算使用预应力管桩的施工周期可省10天左右，桩基费用可省45万元左右，经济效果更好。

结语

本文提出了岩溶地区工程地质勘察设计要求和建筑桩基设计要点，通过工程实例分析得到如下结论：一是溶洞对桩基设计影响较大，在地质勘察中应物探与钻探结合进行，2种勘探手段互相印证，才能准确高效发现灰岩地区溶洞，并提出了分阶段使用勘探手段和确定每个阶段勘察重点。二是从桩身选型，持力层选择，桩身承载力预估，溶洞稳定分析和溶洞处理入手，对岩溶地区桩身设计重点进行总结，重点介绍了溶洞稳定性的定性分析和定量分析方法。三是由工程实例引出桩型选择的基本思想，当桩体端头以下3倍桩径和5m深以内有溶洞，按结构力学近似分析法验算，在符合稳定性条件下可不处理溶洞。交付多年使用后，沉降稳定，未出现其他异常情况，说明桩基安全、可靠，溶洞处理措施适当、有效。

参考文献

- [1] 王宏刚，李艳春. 公路岩溶地区桥梁桩基的勘察设计[J]. 交通世界，2021（26）：139-140.
- [2] 朱晴晴. 岩溶区桥梁桩基勘察与设计要点研究[J]. 黑龙江交通科技，2021，44（08）：113-114.
- [3] 赵睿，赵康. 岩溶地区公路桥梁桩基设计分析[J]. 运输经理世界，2021（12）：71-73.
- [4] 蒋国龙. 岩溶区桥梁桩基施工技术及其设计方法研究[J]. 工程技术研究，2021，6（07）：229-230.
- [5] 岳鹏飞，蒋大园. 岩溶地区高层建筑桩基设计探讨[J]. 工程建设，2020，52（12）：53-56.
- [6] 蒋立浩. 岩溶地区带上盖开发车辆段桩基设计与研究[J]. 城市住宅，2020，27（09）：240-242.
- [7] 俞弘，林绍良. 岩溶地区高层建筑的桩基设计与施工[J]. 福建工程学院学报，2020，18（03）：223-227.
- [8] 郑晓慧. 岩溶区桩基力学特性分析及桩型优化设计研究[J]. 地质与勘探，2018，54（04）：824-832.