

文章编号: 1674—8247(2020)05—0063—05

* DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.012

汉江特大桥覆盖型岩溶地质特征及处理措施研究

曾德建 王茂靖 杜宇本

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文以郑万高速铁路汉江特大桥为研究对象,通过对覆盖型岩溶覆盖层物质成分、结构、岩溶发育规律进行研究,并结合工程实际,对工程范围内岩溶地面塌陷进行评价、预测,提出了在勘察设计过程中应进行规避和减少岩溶对结构工程的影响;针对汉江特大桥下伏岩溶发育特征,制定了岩溶处理措施;总结了防止施工引起的岩溶地面塌陷的方法该措施方法有效可行,可供类似工程借鉴和参考。

关键词:覆盖型岩溶;岩溶评价;岩溶处理;沙漏型塌陷

中图分类号:P642.25 文献标志码:A

Research on Geological Characteristics of the Covered Karst and Treatment Measures for Hanjiang Super-major Bridge

ZENG Dejian WANG Maojing DU Yuben

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

63

Abstract: The Hanjiang Super-Major Bridge on the Zhengzhou-Wanzhou High-Speed Railway is taken as the object of research in this paper. Through the research on the covering layer material composition, structure and karst development law of the covered karst, and in combination with the actual conditions of the Project, the karst ground collapse within the project area is evaluated and predicted. It is pointed out in the paper that the impact of karst on structural engineering shall be avoided and reduced in the survey and design process; karst treatment measures are put forward according to the underlying karst development characteristics of the Hanjiang Super-Major Bridge; methods to prevent karst ground collapse caused by construction are also summarized. These measures and methods are all effective and feasible, and can be used for reference in similar projects.

Key words: covered karst; karst evaluation; karst treatment; hourglass-type collapse

按可溶岩的埋藏条件,一般可将岩溶划分为裸露型岩溶、覆盖型岩溶和埋藏型岩溶三种类型^[1]。其中,覆盖型岩溶在抽排水、爆破、加载、振动等人为干扰下,常常容易引发地表塌陷,造成重大经济损失,危害人民的生命和财产安全^[2]。在铁路工程建设中,人们对岩溶塌陷影响深度的认识逐步加强;南昆铁路建设时,覆土厚度大于15 m则不考虑岩溶塌陷影响;内昆、

株六铁路建设期间,覆土厚度大于20 m时不再考虑岩溶塌陷影响^[3]。而郑万铁路建设期间,覆土厚度达30m的地段,施工过程中仍发生了岩溶塌陷。本文结合郑万高速铁路汉江特大桥覆盖型岩溶发育特征以及桩基开挖过程中出现的地面塌陷现象,总结了该类工程地质桥梁桩基勘察设计的原则、思路方法、注意事项以及工程处理措施,为覆盖型岩溶桥梁桩基施工地面

收稿日期:2020-01-12

作者简介:曾德建(1982-),男,高级工程师。

引文格式:曾德建,王茂靖,杜宇本. 汉江特大桥覆盖型岩溶地质特征及处理措施研究[J]. 高速铁路技术,2020,11(5):63-67.

ZENG Dejian, WANG Maojing, DU Yuben. Research on Geological Characteristics of the Covered Karst and Treatment Measures for Hanjiang Super-major Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):63-67.

塌陷的防治提供依据。

1 工程与地质概况

1.1 工程概况

郑万铁路汉江特大桥全长 28.3 km。该桥起于襄阳盆地与大洪山交界处,延伸于襄阳盆地,属典型冲积平原区厚覆盖层地带,绝对高程 55~75 m,地形平坦开阔,起伏较小,植被较发育。

1.2 地质概况

本文研究的主要范围为大桥起点至汉江边小里程端,共 85 个墩台,长 3.1 km。该段范围内上覆 5~10 m 第四系冲洪积层(Q_4^{al+pl})中密粉细砂,中间夹含 15~20 m 厚中密状细圆砾土,下伏基岩为震旦系上统灯影组(Z_2dn)白云质灰岩及绿泥石片岩。桥址其余地段出露地层为襄阳盆地冲洪积层(Q_4^{al+pl})粉细砂、中密状圆砾土等,厚度大于 100 m。

桥址范围内地表水为汉江河水,河流较宽,流量受季节变化影响较大,为常年流水河流。地下水以孔隙水、岩溶水为主,孔隙水赋存于第四系全新统覆盖层砂

卵石土层中,砂卵石土层为主要含水层,其透水性强,地下水与汉江地表水联通性较好。地下水水位埋深 7~8 m,地下水水位与汉江水位基本齐平,地表水对地下水补给及时,地下水发育。

2 岩溶发育规律

汉江特大桥小里程端前 85 个墩台范围内,勘察期间共完成地质钻孔 406 个,揭示各种溶洞 1 100 个。勘察资料揭示该段范围内岩溶强烈发育,岩溶为该桥梁的主要不良地质,对桥梁工程影响较大。

2.1 岩溶发育规律

汉江特大桥小里程端上覆 20~30 m 透水性强的粉细砂、砂砾石覆盖层,该段范围内地下水发育,基岩上覆圆砾土透水性较强,岩溶主要发育深度位于覆盖层与基岩接触带之间,局部地段岩溶发育较深,属覆盖性岩溶。工程地质纵断面如图 1 所示。

岩溶以多层串珠状溶洞形式发育,揭示溶洞数量统计如表 1 所示。

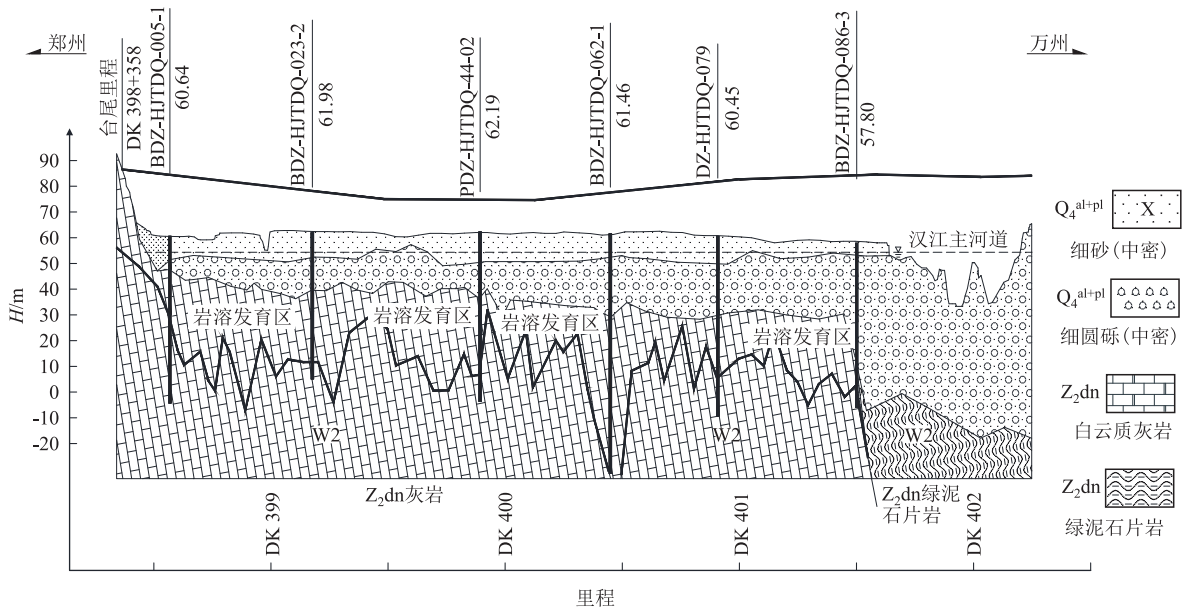


图1 汉江特大桥小里程端工程地质纵断面图

表1 揭示溶洞数量统计表

钻孔总数 /个	遇溶洞钻孔 数量/个	溶洞数量 /个	钻孔遇洞率 /(%)	串珠状溶洞 数量/个	充填溶洞		空洞	
					数量/个	充填率/%	数量/个	空洞率/%
406	345	1 100	84.98	268	956	86.91	144	13.09

由表 1 可以看出,下伏基岩内岩溶强烈发育,钻孔遇洞率高达 84.98%。

溶洞主要以充填型为主,充填物主要为圆砾土和砂层,局部充填有黏土。溶洞充填物质成分统计如表

2 所示。溶洞充填物质来源于基岩上覆盖层物,洞内充填物密实度差,钻探揭示充填物采取率较低,一般在 30%~40% 之间。由于基岩上覆盖层为圆砾土,圆砾间由细砂充填,圆砾土自稳能力较差,在溶洞形成通道

后,圆砾土能较好地通过溶洞通道,充填整个溶腔,故空洞较少。

表2 溶洞充填物质成分统计表

溶洞总数/个	砂		圆砾土		黏土		空洞	
	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%
1 100	245	22.27	643	58.45	68	6.18	144	13.09

不同规模溶洞个数及分布频率统计如表3所示。从表3中可以看出,该段范围内溶洞尺寸大小主要集中在1~4 m,随着溶洞规模的增大,溶洞数量减小。

表3 不同规模溶洞个数及分布频率统计表

溶洞个数/个	溶洞尺寸													
	≤0.5 m		0.5~1.0 m(含)		1.0~2.0 m(含)		2.0~4.0 m(含)		4.0~6.0 m(含)		6.0~8.0 m(含)		>8.0 m	
	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%
1 100	75	6.82	168	15.27	316	28.73	310	28.18	115	10.45	69	6.27	47	4.27

表4 溶洞垂向发育特征统计表

溶洞总数/个	溶洞埋深													
	≤10.0m		10.0~20.0m(含)		20.0~30.0m(含)		30.0~40.0m(含)		40.0~50.0m(含)		50.0~60.0m(含)		>60.0m	
	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%	数量/个	频率/%
1 100	4	0.36	46	4.18	367	33.36	387	35.18	189	17.18	61	5.55	46	4.18

综上所述,受汉江地表水影响,研究范围内地下水补给及时,流动性强,发育的地下水及强透水性覆盖层造成下伏灰岩与覆盖层接触带范围内岩溶强烈发育,且溶洞大小、深度不一。其中,溶洞尺寸大小主要集中在1~4 m范围内,岩溶发育深度主要位于基岩面以下0~20 m范围内,溶洞内主要由细圆砾土充填,岩溶对桥梁桩基础影响较大。

2.2 岩溶评价标准

根据可溶岩的埋藏条件分类,研究范围内岩溶属覆盖性岩溶^[1]。按TB 10027-2012《铁路工程不良地质勘察规程》地面塌陷评价体系,对该段范围岩溶塌陷进行评价,得出该段岩溶塌陷指标为75,为易塌陷区,存在地面塌陷的可能^[4-5]。

覆盖型岩溶地面塌陷主要评价土体变形及其地面效应、岩溶(主要是岩溶通道和溶洞)和触发因素(包括自然因素和人为因素)三方面内容。结合研究范围内岩溶的发育规律,分析得出该范围内桩基施工可能引发沙漏型岩溶地面塌陷。

在覆盖型岩溶地区,当覆盖层为松散的沙性土时,溶蚀裂隙、落水洞等为沙性土颗粒的漏失提供通道,各种规模的溶洞及地下暗河系统则为沙颗粒的储存提供空间。在外部因素(桩基施工冲积荷载)的触发下,沙

根据钻孔揭示,最大腔溶洞顶底板达12 m,但结合相邻钻孔分析,该溶洞为溶缝的可能性很大,不属于大型溶厅,整体塌陷的风险较小。

溶洞垂向发育特征统计如表4所示。由表4可以看出,岩溶垂向发育埋深主要在20~50 m之间,岩溶向深部发育相对较少。由于该段范围内基岩上覆土层厚20~30 m,分析得出,下伏基岩受地下水影响,岩溶发育深度主要位于基岩面以下0~20 m范围内,局部地段岩溶发育较深。

颗粒逐渐漏失。随着沙颗粒漏失量的增大,在地表逐渐形成规模较大的塌陷坑,即发生岩溶地面塌陷。

3 岩溶勘察设计

3.1 岩溶勘察

岩溶勘察过程主要以钻探为主,钻探根据场地地质条件和桥跨设置,以能探明地基各岩土层分布、岩溶发育程度和地基强度,满足场地稳定性评价要求为度,结合基础类型及岩溶发育程度进行钻孔布置,钻探按分序进行。

每个墩台首先布置1~2个钻孔,对角线桩位布置,然后根据钻孔揭示岩溶发育情况逐步加孔。当钻探发现≥0.5 m的溶洞或溶隙时:(1)当揭示溶洞底板深度<9 m且溶洞高度<5 m时,不增加钻孔(揭洞深度<9 m且溶洞高度≥5 m时另行研究);(2)当溶洞底板深度>9 m时,在墩台另外一个对角线增加2个钻孔,并在其相邻桩位增加1个钻孔(合计增加3个钻孔)。新增钻孔再遇底板深度>9 m的溶洞时,则再于相应的相邻桩位增加2个钻孔,以此类推,直至逐桩。钻孔遇溶洞相邻桩位增加钻孔代表性布置如图2所示。

3.2 岩溶桩设计

针对覆盖型岩溶发育规律,结合西南地区铁路岩

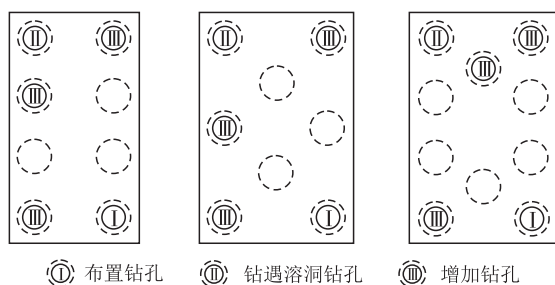


图2 钻孔遇溶洞相邻桩位增加钻孔代表性布置示意图

溶桥梁桩基设计经验,在岩溶发育地区,根据钻探揭示的溶洞情况,尽量采用桩基础。选取合理桩基类型及合理桩长,以满足高速铁路对桥梁桩基础的沉降及变形要求。根据不同的地质条件、覆盖层厚度及岩溶特征,将桩基础设计分为三种类型。

(1) 岩溶弱发育或溶洞层数少,有完整的岩溶支承顶板厚度时,桩基设计可为不等桩长的柱桩基础,桩底必须嵌入岩层一定深度。

(2) 发育多层串珠状溶洞且发育较深,各层溶洞顶板较薄,无稳定基岩作为桩的持力层时,桩身可能连续穿透几个溶洞(槽),其累计岩壁厚度达到一定数值,可按摩擦桩设计,但桩端应置于一定厚度的岩溶顶板中。同时应考虑基础的不均匀沉降,必要时对桩基以下的溶洞进行注浆加固处理。

(3) 覆盖层较厚,岩溶埋藏较深,溶洞内有填充物时,可设计为短桩大承台基础,桩支承在覆盖层内,群桩按摩擦桩计算。但应首先对场地稳定性进行评价,对于岩溶塌陷高风险区和极高风险区,不宜采用摩擦桩基础。

汉江特大桥小里程端岩溶发育范围内的85个桥基础均采用钻孔桩柱桩基础,桩底均嵌入岩层一定深度,桩基础形式按端承桩考虑,最大桩长达85.5 m。

4 岩溶工程处理措施

4.1 桥梁桩基施工现场

针对汉江特大桥小里程端岩溶发育特征,桥梁桩基础施工过程中主要采取钢护筒跟进、抛填黄泥片石、局部地段注浆加固等处理措施。

桥梁桩基础施工主要采用冲击钻进行施工,施工过程中多次出现地面塌陷现象,严重影响了现场施工人员、设备以及主体结构的安全。结合该段范围内岩溶发育规律以及施工中出现的地面塌陷,分析判断塌陷符合沙漏型塌陷的规律,成孔过程中产生的动荷载和岩溶提供的有效空间形成了产生沙漏型塌陷的必要

条件。

桩基施工产生地面塌陷的主要原因是:基岩上覆的粉细砂、砂砾石层凝聚力很小或近似于0,多孔隙且透水性强,土颗粒运动的阻力主要为粒间摩擦力。由于桥址区地下水位较高,致使上覆盖层饱水,在桥桩基施工过程中,冲击钻的动荷载作用导致地下水位上下频繁波动,砂砾石层中形成孔隙水压力,其有效应力降低,粒间摩阻力减小,在重力的作用下,土颗粒发生位移的自由度增大。当冲击钻击穿溶洞顶板后,覆盖层与溶腔的连通通道形成,覆盖层顺通道进入溶腔,从而造成了地面塌陷。

4.2 岩溶工程处理措施

针对汉江特大桥岩溶塌陷现象,为保证成孔过程安全和成桩质量,根据各墩台的岩溶发育情况,选取回填粘土、抛填片石、回填素混凝土、钢护筒跟进、地层注浆、空洞压浆或压注素混凝土等方法进行岩溶处理,如表5所示。

4.3 防地面塌陷对策

根据现场施工情况,总结了防止岩溶地面塌陷的几点措施:

(1) 根据地质勘察资料,对施工过程中可能引发地面塌陷的桩基础进行预判。对桩基施工过程中,震动及地下水位变化可能引起地面塌陷的区域,在施工前对覆盖土层和基岩影响范围进行注浆加固处理,能有效防止地面塌陷。

(2) 在桩基影响范围内,尽量减小地下水的抽排,减小水位波动。

(3) 桩基础施工时,应尽量采用对周围土体扰动较小的机械设备(如大功率旋挖钻),以减少对溶洞周围土体的扰动。

5 结论

本文以郑万高速铁路汉江特大桥为研究对象,对覆盖型岩溶覆盖层物质成分、结构、岩溶发育规律进行研究,得出以下主要结论:

(1) 覆盖型岩溶为特殊的不良工程地质,其复杂性、隐蔽性和发育不均一性常给勘察、设计、施工带来意想不到的困难。勘察过程中,应对覆盖型岩溶的覆盖层地质结构、物质组成、地下水发育情况、岩溶发育特性等进行充分的地质勘察,特别是当下伏可溶岩岩溶特别发育时,应实施足够的钻孔查明隐伏岩溶发育特征,分析岩溶发育规律,提出科学合理的工程措施。

(2) 结合覆盖层地质结构及岩溶发育特征,对施

表 5 桩基施工岩溶处理方法

序号	处理方法	适用范围	处理工艺	备注
1	常规成孔	溶洞有填充物,为可塑或软塑粘土,且溶洞不漏水	采用常规冲击钻成孔工艺	这 4 种施工方法均为 桩基施工过程中实施的 措施
2	片石回填	适用于较小溶洞(溶洞高度小于 5 m),无填充物或半填充物,施工方法简单	采用正常成孔方法施工,当钻穿溶洞漏浆时,反复投入黄土和片石,利用钻头冲击将黄土和片石挤入溶洞和岩溶裂隙中,还可掺入水泥、烧碱和锯末,以增大孔壁的自稳能力	
3	素混凝土回填	适用于中、小溶洞(含倾斜岩面溶洞),有无填充物均可采用此方案。施工方法简单,造价相对较高	采取正常成孔方法施工,当钻穿溶洞漏浆时或遇到倾斜岩面时填入低标号混凝土,间隔一定时间后采用冲击钻成孔	
4	钢护筒跟进	适用于特大溶洞(溶洞高度大于 4 m)、无填充溶洞、半填充溶洞或溶洞上方有较厚的砂砾层,极易塌孔时	采用钢护筒跟进法:一边冲孔,一边接长钢护筒,并且将其压到或震动下沉至已钻成的孔内,或穿过易塌层	
5	注浆加固(双浆液)	多适用于小型(高度小于 1 m)或多层溶洞(多层串珠状小溶洞),也可用于各种有填充物的溶洞,但造价较高。	注浆加固处理工艺是通过地质柱状图,在桩基成孔施工前,对将要穿过的溶洞进行事前填充和加固处理。	这 3 种施工方法均为 桩基施工前预先实施的 措施
6	灌砂、压浆	灌砂压浆是溶洞预处理方案之一,一般适用于 6~10 m 的无填充溶洞	通过灌砂填塞溶洞空间,采用压浆将洞内砂砾、凝固成坚实混和体,防止在钻孔过程中出现漏浆、塌孔等现象	
7	灌注混凝土填充	溶洞的厚度在 1.0~3.0 m 之间无填充物溶洞	利用超前钻孔向孔内灌注混凝土干料,填满溶洞,在固结体达到一定强度后(2.5 MPa)即可进行冲孔施工,若遇溶洞空间容积大、导水性强,则在混凝土干料中添加一定量水玻璃	

工过程中是否会发生岩溶塌陷进行评价。为保证工程质量安全,桥梁桩基设计应充分考虑覆盖型岩溶特征,桩基础按要求嵌入基岩一定范围内,以保证主体工程安全。

(3)为防止施工过程中发生地面塌陷,针对汉江特大桥范围内岩溶发育特征,制定了岩溶处理措施,并建议尽量减少施工开挖对岩溶周围土体的扰动,减少施工开挖引起的地下水水位波动。

参考文献:

[1] TB 10027-2012 铁路工程不良地质勘察规程[S].
TB 10027-2012 Code for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering[S].

[2] 罗小杰. 也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 886-895.
LUO Xiaojie. Further Discussion on Mechanism of Covered Karst Ground Collapse[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5):

886-895.

[3] 付开隆, 蒋良文, 冯涛, 等. 贵广铁路甘棠江特大桥 19、20 号墩异常沉降原因分析及整治措施[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 674-680.
FU Kailong, JIANG Liangwen, FENG Tao, et al. Cause Analysis and Treatment Measures to the Abnormal Subsidence of Gantangjiang Bridge No. 19 & 20 Piers of Guiyang-Guangzhou Railway [J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(6): 674-680.

[4] 罗小杰, 罗程. 覆盖型岩溶地面塌陷综合地质预测与危险性评估[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 51-59.
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Comprehensive Geological Prediction and Risk Assessment of Covered Karst Ground Collapse [J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(1): 51-59.

[5] 唐万春. 高速铁路厚覆盖型岩溶路基地质工程问题系统研究[D]. 成都:成都理工大学,2011.
TANG Wanchun. Systematic Study on Geological Engineering Problems of Thick-covering Karst Subgrade in High-speed Railway [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2011.