

隐伏型岩溶强发育区桩基处治方法研究

张金, 杨俊, 姚玉强, 陈绍军

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 粤北灰岩地区岩溶发育强烈,多属隐伏型岩溶,岩溶区桩基处治方法的选用将制约桩基设计和施工的经济合理性。结合隐伏型岩溶强发育区案例区域地形地质条件、区域构筑物施工情况,对岩溶区桩基处治方法进行适应性分析。对比发现,化学注浆法可提升软弱覆盖层整体性,使溶洞范围形成稳定固结体,桩基满足可施工成孔条件,且可实施性高、经济性好。桩基施工缺陷处治实践案例表明,化学注浆加固方案合理可行,注浆效果最终达到预期目标。

关键词: 岩溶;桩基施工缺陷;处治方法;化学注浆

中图分类号: U443.15

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)08-0226-04

0 引言

岩溶为可溶性岩层(碳酸盐、硫酸盐、卤素岩等)被水长期溶蚀而形成的各种地质现象和形态。广东省碳酸盐岩分布面积占全省面积7%,主要集中在粤北地区。粤北地区岩溶发育较强烈,存在大大小小的溶洞和纵横交错的溶裂,粤北岩溶发育区约占粤北面积的1/3^[1]。粤北灰岩区的主要岩土工程地质问题是土洞和溶洞发育^[2]。

随着交通建设的深入推进和路网的加密延伸,高速公路不可避免地需要穿越岩溶地区,其中岩溶地区的桩基设计与施工是公路建设的关键环节。本文以粤北地区某高速公路的桥梁桩基处治为案例,提出了隐伏型岩溶强发育区桩基处治的方法与思路,旨在为同类工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

1.1 区域地质条件

粤北地区某高速公路朝阳大桥所处桥址区地形较平坦,主要由第四系填土层、第四系全新统、更新统冲洪积层、第四系更新统残积层、白垩系三水组、泥盆系天子岭组地层组成。白垩系三水组泥质粉砂岩属特殊性岩土,遇水易软化,强度急剧降低。桥址区地下水丰富,主要为覆盖层孔隙潜水和基岩裂隙、岩溶水,不良地质主要为岩溶,下伏灰岩埋深变化大,节理、溶隙、溶洞密集分布,岩溶强发育,属隐

伏型岩溶。

1.2 桩基施工缺陷

朝阳右幅2-1号案例桩基桩径1.6 m,按端承摩擦桩设计,设计桩顶15.267 m,桩底-41.733 m,桩长57 m,桩底置于溶洞底面以下,并保证桩端有足够顶板厚度作为持力层。案例桩基采用冲孔桩工艺,冲进期间累计出现18次孔内漏浆、塌孔、地表塌陷、地面涌浆等施工缺陷状况,过程采取孔内充填法(片碎石、片石黏土、混凝土)、塌陷区硬化、增设钢护筒等措施,效果均不理想,最深冲进位置仍然位于溶洞内,未达到成桩要求。

1.3 桩基地质情况

案例桩基所在右幅2号桥墩地质横剖面见图1。其中钻孔QSZK117-3在标高-28.82~-38.12 m存在单个高9.3 m的溶洞,QSZK-ZY-2-4在标高-18.12~-21.32 m存在累计高2.0 m的串珠状溶洞,QSZK-ZY-Y2-1B在标高-37.65~-38.95 m存在单个高1.3 m的溶洞,洞内均充填软塑状黏土。

2 桩基处治方法对比分析

岩溶地区地基常用处治方法有:充填法、跨越法、深层挤密法、化学注浆法、桩基法、护筒防护法^[3]。

结合案例桩基施工缺陷、工点区域地质、区域构筑物实施情况等受限因素,通过桩基处治方法的适应性分析对比发现(见表1):

(1)充填法、深层挤密法,在桩基施工过程中已采用过,施工缺陷状况反映出覆盖层较软弱,地下水较丰富,软弱层桩孔护壁易透水坍塌,溶洞内充填物易

收稿日期: 2021-01-15

作者简介: 张金(1987—),男,硕士,工程师,从事公路桥梁结构与研究工作。

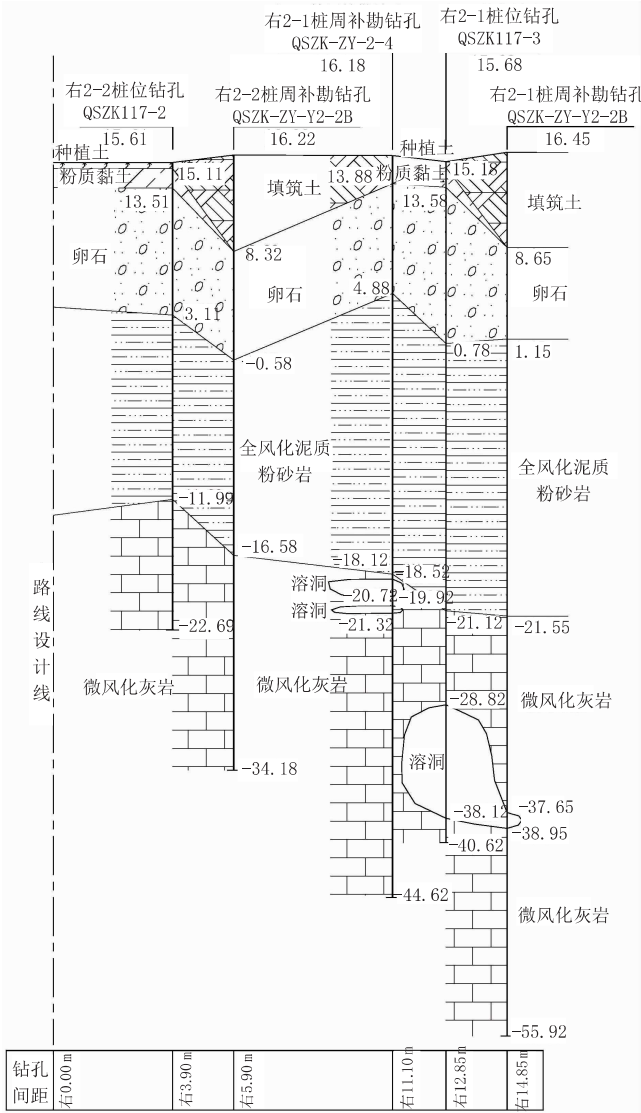


图1 桥墩地质横剖面(单位:m)

被流动溶隙水冲塌带走,桩周护壁始终无法完成,效果不理想,不建议采用。

(2)跨越法、桩基础法,存在改移下构位置、增加桩基的情况,在岩溶发育且不规则的条件下,改移后的下构基础存在遇溶率增加的可能,工期长、造价

高、不确定性因素多,不建议采用。

(3)护筒防护法,采取双层钢护筒护壁跟进至溶洞底,达到硬性隔离的目的,但深层钢护筒设置过长,跟进过程中易受既有充填物、不规则岩面影响而出现屈曲,一旦发生变形则无法完全纠偏,存在较大的施工风险,不建议采用。

(4)化学注浆法,通过桩周软弱层注浆,使浆液渗透硬化并与桩周咬合,提升完整性;桩身范围注浆,使浆液与溶洞内充填物结合形成稳定固结体,减弱流动溶隙水影响,达到桩基可施工成孔条件,可实施性高、经济性好,建议采用。

3 桩基处治方案

3.1 总体思路

桩基施工缺陷处治的总体思路:

首先回填原桩孔至地表,静置稳定;然后对桩周软弱覆盖层和桩身溶洞范围采取化学注浆加固措施,确保覆盖层稳定、洞内形成稳定固结体,待注浆实施完再取芯检测;当注浆效果达到预期目标后,按单桩冲孔成桩方案复冲施工。

3.2 注浆加固方案

化学注浆加固是处治桩基施工缺陷的关键环节,包括桩周孔注浆和桩身孔注浆。

(1)桩周孔穿过软弱覆盖层至岩面以下约1.0 m处,在桩身外侧60 cm处沿圆周设置单层共15个注浆孔(见图2),相邻孔间距按约60 cm布置,注浆孔深38 m,孔内压注水泥浆液。

(2)桩身孔穿过溶洞至交界面以下约1.0 m处,桩身范围布置3个注浆孔,相邻孔间距90 cm,呈等边三角形布置(见图2),注浆孔深56 m,孔内压注水泥和水玻璃的混合浆液。

表1 桩基处治方法适应性分析对比

处治方法	拟采用处治措施	受限条件	适应性分析
充填法	片碎石、混凝土充填溶洞	受流动溶隙水影响	充填物易被流动溶隙水冲塌,桩周护壁不易完成
跨越法	调整桥跨以改变下构位置	区域岩溶发育且不规则区域构筑物已实施	调跨后改移位置的下构基础存在遇溶率增加的可能,不确定因素多
深层挤密法	片石黏土深层冲击挤密溶洞	受流动溶隙水影响	挤密层易被流动水稀释,稳定性差
化学注浆法	桩周软弱覆盖层注浆,桩身范围注浆充填溶洞	桩身范围注浆充填溶洞易受流动溶隙水影响	提升覆盖层完整性,使洞内形成较稳定固结体,可达到桩基成孔的条件
桩基础法	单桩变更为群桩基础	桩周覆盖层不稳定区域岩溶发育且不规则	群桩基底需置于稳定基岩面,遇溶率增加,不确定因素多
护筒防护法	双层钢护筒跟进至溶洞底	区域岩溶发育且不规则	深层钢护筒设置较长,跟进过程中易发生屈曲变形,存在施工风险

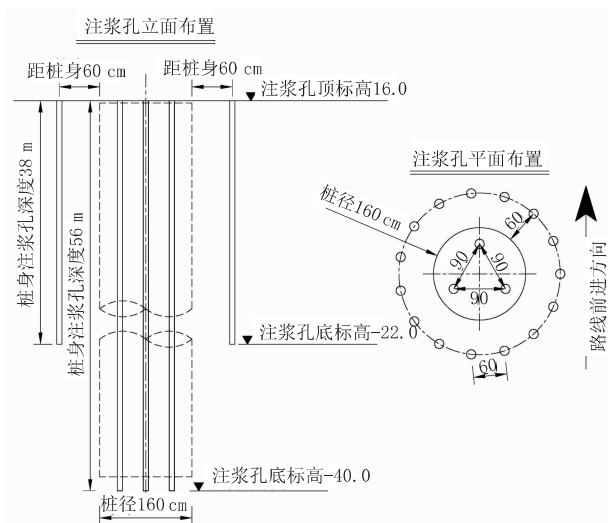


图 2 案例桩基注浆孔布置示意

(3) 注浆孔利用地质钻机成孔, 钻孔设计外径 130 mm, 在钻进过程中采取跟进套管以确保成孔质量及成孔率, 成孔后再将套管拔出。

(4) 利用钢花管注浆技术^[4], 使注浆效果达到最佳。钢花管采用 $\phi 89 \times 4.5$ mm 无缝钢管加工制作且沿管轴线交错间隔 20 cm 在管壁上呈梅花状设置注浆小孔(孔径为 1.0 cm), 小孔用特制胶带或凝胶密封, 钢花管间接头采用钢套管连接。注浆管应下至注浆孔孔底, 并同步跟设套管, 施工时宜先孔底压浆后再提升注浆管分层压浆, 外层套管应随注浆管同步提升, 保证注浆效果和实施范围, 以防串浆、跑浆。

(5)注浆施工主要工序:桩位布设注浆孔→孔位放点→钻机就位→钻进成孔(跟管钻进)→下注浆管(跟设套管)→注浆施工→孔口压浆→终凝前补浆→结束封孔。

施工时宜先进行桩身孔注浆,再进行桩周孔注浆,应注意桩基内外注浆孔施工的间隔时间、同批次施工注浆孔的间距和间隔时间。

3.3 注浆加固参数

3.3.1 注浆材料

注浆浆液的水灰比应根据土的饱和度和渗透性确定^[5]。采用水泥砂浆浆液时,对于饱和土,水灰比宜为 0.45 ~ 0.65,适用于粉质黏土、卵石土;对于非饱和土,水灰比宜为 0.5 ~ 0.6,适用于全风化泥质粉砂岩,工点综合控制水灰比为 0.5 ~ 0.6。采用水泥和水玻璃的混合浆液时,可在原水泥浆液中掺入水玻璃,水玻璃用量约为水泥用量的 20%,水玻璃模数为 2.5 ~ 3.3,这样浆液不仅具备水泥浆的强度,又具备水玻璃的渗透性^[6]。

3.3.2 注浆压力

若注浆压力过大,易破坏软弱地层的整体稳定性,故考虑低压力方式注浆。当采用水泥砂浆浆液时,注浆压力宜为 1.0 MPa;当采用水泥和水玻璃的混合浆液时,注浆压力应不大于 1.0 MPa^[7]。

3.3.3 设计注浆量

设计注浆量包括桩身范围溶洞区域的岩溶注浆量和桩周土体注浆量。

岩溶注浆量根据岩溶裂隙发育情况计算^[8]:

$$V_1 = K \pi R^2 L \mu \beta' \lambda (1 - \gamma) \quad (1)$$

式中: K 为土石界面下基岩的实际充填系数, 宜为 $2 \sim 3$, 水平岩溶发育区取小值, 垂直岩溶发育区取大值, 此处综合区域地质情况取值 3 ; R 为扩散半径, 宜为 $3 \sim 5 \text{ m}$, 此处综合取值 3 m ; L 为压浆段长度, 此处取桩身范围溶洞高度 9.3 m ; μ 为岩溶裂隙率, 此处综合区域钻孔遇溶洞率、岩溶发育情况近似取 50% ; β' 为有效充填系数, 一般为 $0.8 \sim 0.9$, 此处取值 0.8 ; λ 为超灌系数, 一般取 1.2 ; γ 为岩溶洞隙填充率, 据钻孔揭示溶洞内充填情况近似取值 0.5 。

采用式(1)计算桩身范围溶洞区域的岩溶注浆量, $V_1=189.3 \text{ m}^3$ 。

桩周土体注浆应先计算单个注浆孔灌注量 V_{20} (参照碱液注浆加固中每孔灌注量的计算^[7]):

$$V_{20} = \alpha \beta \pi r^2 (l+r) n \quad (2)$$

式(2)中: α 为有效充填系数,一般为 0.6~0.8,这里取值 0.8; β 为浆液流失损耗系数,一般取 1.1; l 为灌浆孔的长度,m; r 为有效加固半径,当无实验条件时,一般取 0.4~0.5 m,这里参照相关工程经验取 0.5 m; n 为拟加固土的天然孔隙率,地勘资料列出有关地层的试验孔隙比样本均值 e 和换算后的天然孔隙率 n (见表 2),计算时桩周土体天然孔隙率 n 取均值 0.39。

表 2 地层孔隙比和天然孔隙率

地层	孔隙比样本均值 e	天然孔隙率 n
粉质黏土	0.65	0.39
卵石土	0.63	0.39
全风化泥质粉砂岩	0.65	0.39

再根据注浆孔位置和个数计算总的桩周土体注浆量。

对于桩周孔, l 为 38 m, 单个桩周孔的灌注量采用式(2)计算得: $V_{20}^a = 10.4 \text{ m}^3$ 。

对于桩身孔,除桩身范围溶洞区域的注浆之外,还应考虑注浆孔在土体范围的注浆量,此处取值

38 m,单个桩身孔的灌注量采用式(2)计算得: $V_{20}^b=10.4\text{ m}^3$ 。

桩周土体总的注浆量 $V_2=V_{20}^a \times 15+V_{20}^b \times 3=10.4 \times 15+10.4 \times 3=187.2\text{ m}^3$ 。

设计注浆量应为 $V_1+V_2=376.5\text{ m}^3$ 。

其中单个桩身孔的平均注浆量计算得: $189.3/3+10.4=73.5\text{ m}^3$ 。

4 桩基处治效果

4.1 注浆效果检验

4.1.1 注浆量对比

从对比情况(见表3)看:第1~15桩周注浆孔施工注浆量比设计量稍多;第16~18桩身注浆孔施工注浆量比设计量少,但总体上设计与施工较匹配,数量存在些许出入与实际地层分布起伏、地层特性差异、注浆施工等因素相关。

表3 注浆量设计施工对比

注浆孔位	设计注浆量 /	施工注浆量 /
1孔	10.4	14.9
2孔	10.4	10.8
3孔	10.4	13.1
4孔	10.4	20.6
5孔	10.4	13.6
6孔	10.4	14.7
7孔	10.4	12.6
8孔	10.4	14.2
9孔	10.4	12.4
10孔	10.4	15.8
11孔	10.4	21.3
12孔	10.4	13.3
13孔	10.4	12.9
14孔	10.4	11.7
15孔	10.4	19.3
16孔	73.5	56.3
17孔	73.5	52.8
18孔	73.5	60.7
合计	376.5	391.0

4.1.2 钻芯法检验注浆效果

由于浆液扩散、发展的模糊性,对注浆效果检验及评判尚无统一的检测手段及评判标准。

本案例采用现阶段常用的钻芯法检验芯样来验

证,检验在注浆施工结束28d后进行,其中设置桩身1个、桩周2个取芯孔。取芯芯样检查发现,浆液与土层、填充物固结良好,密实度均在85%以上,表明注浆效果达到预期目标。

4.2 冲孔成桩验证

注浆达到预期目标后,现场复冲桩基并且顺利终孔,浇筑混凝土后成桩,最终工点桩基施工缺陷得到成功处治。

5 结 语

(1)粤北灰岩地区岩溶发育强烈,多属隐伏型岩溶且灰岩埋深大,桩基处治方法的选用主要受区域地形地质、区域构筑物施工情况的限制。

(2)针对隐伏型岩溶强发育区案例桩基施工缺陷状况,对岩溶区桩基处治方法进行了适应性分析,对比发现化学注浆法可提升软弱覆盖层整体性、阻隔地下水下渗、使桩身溶洞范围形成较稳定的固结体、减弱流动溶隙水影响,使桩基满足可施工成孔条件,可实施性高、经济性好。

(3)设计了施工缺陷案例桩基的化学注浆加固方案和注浆加固参数,为桩基施工缺陷处治提供技术支撑和依据。

(4)桩基施工缺陷处治实践案例表明化学注浆方案合理可行、注浆效果最终达到预期目标。

(5)隐伏型岩溶强发育区利用化学注浆加固措施可有效处治桩基施工缺陷。

参考文献:

- [1] 李稼轩. 粤北岩溶地区预制桩复合地基宏观本构的建立与研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [2] 林本海,杨树庄,朱伯善,等.广东省地质构造与岩土工程基本特征[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊2):3337-3346.
- [3] 林鲁生,徐礼华.岩溶地区高层建筑地基基础设计与施工[M].北京:科学技术出版社,2017.
- [4] 马颖仙.钢花管注浆在重载铁路施工中的应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(2):78-82.
- [5] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
- [6] 薛阔,王立娜,窦法楷,等.钢花管注浆技术在隧洞加固中的应用[J].施工技术,2016,45(增刊):194-197.
- [7] JGJ 79—2012,建筑地基处理技术规范[S].
- [8] TB 10106—2010,铁路工程地基处理技术规程[S].