

电厂溶洞地基处理关键技术和疑难问题分析

周雷靖, 余国兆, 林伟斌

引用本文:

周雷靖, 余国兆, 林伟斌. 电厂溶洞地基处理关键技术和疑难问题分析[J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 69–75.

ZHOU Leijing, YU Guozhao, LIN Weibin. Key Technology and Difficult Problem Analysis of Karst Cave Treatment in Power Plant Project[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(增刊1): 69–75.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

大型泵房沉井在深厚软土层中的下沉控制应用研究

Application Research of Sinking Control of Large Pump House Open Caisson in Deep Thick Soft Soil Layer

南方能源建设. 2015, 2(z1): 123–127,49 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.027>

基于某燃机电厂的岩溶土洞不同处理方案对比研究

Research on Different Treatments of Karstic Earth Cave Based on a Gas Turbine Power Plant

南方能源建设. 2017, 4(z1): 125–128 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.024>

高压注浆法在提高地基剪切波速中的应用——以台山核电站废液储存罐厂房地基为例

Application of High-pressure Grouting Foundation Treatment Based on Increasing Shear Velocity in Taishan Nuclear Power Plant

南方能源建设. 2016, 3(3): 108–111 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.023>

插排水板堆载预压地基处理方案分析——以某滨海核电厂取水明渠工程为例

Application of Plastic Drainage Plate Combined with Surcharge Preloading: A Case Study of Water Intake Channel in a Nuclear Power Plant

南方能源建设. 2016, 3(3): 100–103,111 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.021>

越南某电厂旋挖灌注桩桩头渗水实例分析

Analysis on Water Leakage from the Top of Rotary Drilling Cast-in-situ Pile in a Thermal Power Plant in Vietnam

南方能源建设. 2016, 3(1): 141–144,131 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.01.030>

电厂溶洞地基处理关键技术和疑难问题分析

周雷靖¹, 余国兆², 林伟斌^{1,✉}

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 华润电力(云浮)有限公司, 广东 云浮 527322)

摘要: [目的] 针对电厂工程中经常存在的复杂岩溶及土洞地基问题以及岩溶及土洞地基处理设计中的疑难问题和施工中容易出现的问题, 如超前钻、灌注桩及管桩施工疑难问题等。[方法] 阐述了相关的岩溶及土洞处理关键技术, 包括处理原则、处理方法(包括充填法、跨越法、桩基法)等内容, 并结合相关规范、费用和实际工程经验进行分析对比。[结果] 给出了岩溶及土洞地基处理中出现的疑难问题解决办法及溶洞地基桩基冲孔施工容易出现的问题及应急预案。[结论] 最后总结了电厂岩溶地基几种处理办法, 可以作为同类工程的参考。

关键词: 电厂; 溶洞; 地基处理; 桩基; 冲孔桩施工

中图分类号: TM611; TU475

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S1-0069-07

开放科学(资源服务)二维码:



Key Technology and Difficult Prople Analysis of Karst Cave Treatment in Power Plant Project

ZHOU Leijing¹, YU Guozhao², LIN Weibin^{1,✉}

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. China Resources Power (Yunfu) Co., Ltd., Yunfu 527322, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] The paper aims to solve the sub-grade problems caused by complex karst and soil cave foundation, design problems in karst and soil cave foundation treatment design, construction problems often occurred in power plant projects, such as advanced drilling, bored pile and PHC pile construction difficult problems etc. . [Method] To describe the relevant karst and soil cave treatment key technologies, including treatment principles, treatment methods (including filling method, crossing method, pile foundation method), we analyzed and compared the relevant specifications, costs and practical engineering experience. [Results] The results we obtained is the solutions to the difficult problems in the treatment of karst and soil cavern foundation and the problems that are easy to occur in the punching construction of pile foundation of karst cavern foundation and the emergency response plan. [Conclusion] Finally, several treatment methods of karst foundation in power plant are suggested, which can be used as reference for similar projects.

Key words: power plant; karst cave; soil treatment; pile foundation; punching pile construction

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

电厂内的建(构)筑物主要有主厂房、汽机基座、锅炉、烟囱、转运站等, 这些建(构)筑物荷载大且对变形要求高, 若厂区内存在岩溶地基, 不管厂房是采用桩基还是天然地基, 都应根据情况进行岩溶处理。岩溶即俗称“喀斯特”, 由碳酸盐, 包括石灰岩、大理岩、泥灰岩、白云岩等长期受地

下水的化学侵蚀和机械作用, 形成了岩溶地质地貌。岩溶地貌主要表现为: 溶槽、溶沟、溶洞、暗河、石芽、钟乳石等地面及地下状态。土洞是指在可溶性岩层与上覆土层间, 由于地下水的潜蚀作用在可溶性岩层形成溶洞后继续扩展至上覆砂土层后形成一种特殊的地质体。土洞与溶洞关系密切, 往

往是岩面上先有溶洞，在地下水的潜蚀作用下，上覆土层不断崩落致使土洞形成扩展，导致地面下沉，开裂塌陷。由于土洞埋藏浅，分布密发育快，顶板强度低，因而危害也大。溶洞及土洞的存在，造成地面变形和地基陷落，水的渗漏和漏水等现象严重危及地基的稳定和安全。对岩溶地区的几个已建电厂项目进行统计，钻孔见洞率从30%~82%，线溶率达25%~55%。如图1所示，为某场址钻探完成后塌陷的现场照片，该位置存在厚度较大松散中砂层，钻探完成当天降雨较大，拔出套管后砂层大量进入钻孔及钻探打通的下部半充填或未充填的溶洞中，导致发生坍塌。在常规电厂内，主厂区的建（构）筑物分布较为密集且数量多，当采用桩基时，全厂的桩基数量往往都在2 000根以上，因此，对岩溶地区的地基处理技术难题比其他行业的工程较为突出。



图1 某场址钻探完成后塌陷现场照片

Fig. 1 Site photo of collapse after hole drilled

1 岩溶及土洞地基处理关键技术

对塌陷或浅埋溶（土）洞宜采用挖填夯实法，跨越法、充填法垫层法处理，对深埋溶（土）洞宜采用注浆法、充填法、桩基法等方法进行处理。

1.1 岩溶区土洞、溶洞处理原则

根据多个电厂的工程经验分析，土溶洞顶板的覆盖层厚度、完整性及密实性、洞体顶板厚度与洞体最大宽度的比值关系^[1-3]，对岩溶地区的处理可按以下原则考虑：

1.1.1 土洞处理原则

土洞按埋藏深度（即覆盖层厚度）进行预估。根据以往工程对岩溶地面塌陷的经验数据在岩溶地面塌陷的三个基本条件中，覆盖层的厚度 H 大小不同，产生的效果也不同。根据模糊统计分析结果和洞体的稳定平衡条件， $H=20\sim 35$ m时，稍有不稳定； $H=10\sim 20$ m时，比较不稳定； $H<10$ m时，相当不稳定，最容易塌陷。

1) 当土洞的埋藏深度较小，如由地表水形成的土洞，或岩面揭露较浅在土岩交界面形成的土洞等情况，一般需进行处理。

2) 当土洞覆盖层的厚度 $H>25$ m时，可不进行处理。

3) 当土洞覆盖层的厚度 $H\leq 25$ m时，由于土洞受地下水影响较大，容易发育，一般需进行处理，也可以根据情况，参照1.1.2节溶洞的处理原则进行处理。

1.1.2 溶洞处理原则

1) 溶洞按天然顶板厚度 H 进行判定，当其顶板厚度 H 大于20 m时，不处理。

2) 当溶洞的天然顶板厚度 H 小于第1)条规定时，则按下方法继续判断：

(1) 若 $H>10h_0+5$ m, ($\frac{H-5}{h_0} < 10$) 则可不处理，

h_0 为洞体高度。

(2) 若 $H\leq 10h_0+5$ m, 则按下方法继续判断：

a) 需要进行溶洞处理的情况

①当洞体顶板稳定或完整，且其厚度 H /最大宽度 $D\leq 1$ 。

②当洞体顶板不稳定或破碎，且顶板厚度 H /洞体最大宽度 $D\leq 2$ 。

b) 可不进行溶洞处理的情况

①溶洞洞体顶板破碎或洞体顶板不稳定，且顶板厚度 H /洞体最大宽度 $D>2$ 。

②洞体顶板完整或稳定，且顶板厚度 H /洞体最大宽度 $D>1$ 。

③对溶洞顶板岩层未被处理裂缝切割或虽被切割但胶结良好的完整顶板，可按厚跨比法确定顶板的安全厚度，当顶板厚度与路基跨越溶洞长度之比大于0.8时，溶洞的顶板层可不作处理^[4]。

1.2 充填法

采用素土、灰土、中砂、砂砾、碎石、混凝土等材料对土溶洞进行充填(水位以下不宜用土、有防渗要求时,不能采用砂砾、碎石)。充填法一般适用于落水洞及浅埋的溶沟(槽),溶蚀(裂隙、漏斗)等情况。

1.3 跨越法

浅埋的开口型式跨度较大的土、溶洞或者基础下有小型溶洞、溶沟(槽),溶蚀(裂隙、漏斗)时可采用梁板跨越,或者采用刚性较大的平板基础覆盖跨越,两端支撑在可靠的岩、土体上,如图2所示。

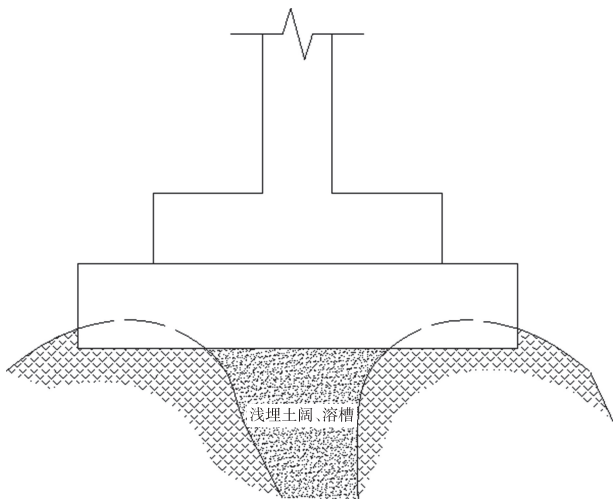


图2 跨越法典型剖面图

Fig. 2 Typical section of crossing method

1.4 桩基法

桩基方法是电厂工程内处理岩溶地基较为常用的方法。在岩溶地区的电厂内,对于大荷载建(构)筑物,桩基不宜采用预制桩,宜采用嵌岩钻(冲)孔桩;对于小荷载的建(构)筑物,当采用预制桩时,宜采用静压桩;在岩溶发育区域,对于灌注桩,应适当提高桩身的混凝土强度等级和配筋率;对于预制桩,根据岩溶发育及分布情况,宜适当降低桩的承载力。岩溶发育区即使采用静压桩,依然无法避免桩尖支于倾斜岩面而滑移的风险。

岩溶地区的大直径嵌岩桩,施工前应逐桩作勘察,勘探深度应不小于预计桩底面以下桩径的3倍,并不小于5 m(广东地基规范规定不小于2 m),当桩端持力层之下有软弱下卧层或破碎带和溶洞时,应校核下卧层的承载力。

2 电厂岩溶及土洞地基处理中的疑难问题

2.1 超前钻

岩溶勘察分以下四个阶段:可行性研究勘察、初步勘察、详细勘察和施工勘察。超前钻是施工勘察阶段的勘察工作。根据几个电厂的经验反馈,各阶段的岩溶勘察资料差异较大。如某电厂初设勘察资料揭示,场地内有溶洞及土洞分布,但存在溶洞的钻孔相对较少,且溶洞大都分布在浅层,洞高也较小。但是,到了详细勘察报告出来后,发现地质情况比初勘揭示的复杂得多。遇溶率72.1%,钻孔见洞率81.6%,线溶率40.5%,场地岩溶发育程度为极强烈发育,溶洞多呈串珠状分布,存在大量高度3~5 m的较大溶洞,发现最大的溶洞高度接近10 m。再者,根据超前钻阶段所揭露的遇溶率和线溶率普遍比详勘阶段的要大。

因此,对于电厂工程,岩溶区域超前钻一般按一桩一孔的布置原则,其具体工作量是根据岩溶地基设计和施工要求布置的,具体要求参照《火力发电厂岩土工程勘察规范》(GB/T 51031—2014)^[4]第6.3.8.1条和广东省标准《岩溶地基基础设计技术规范》(DBJ/T15-136—2018)^[5]第4.3.9条。

超前钻探孔费用可查勘察收费定额。超前钻(即施工勘察)原则上与详细勘察应基本一致,但肯定有差别,否则要作施工勘察是多余的,施工勘察的钻孔原则上可用为注浆施工的设计基础资料,但不排除还要加密探摸孔或必要添加的排气孔。

2.2 岩溶地基中灌注桩桩基施工

根据勘察报告反映的洞高和洞内填充物情况,采取不同的处理方法。不少学者各自提出了岩溶地区桩基施工的处理措施^[6-14],主要的处理方法有:在冲击造孔施工过程中,可采用回填造壁法、注浆处理法、混凝土灌注法、钢护筒跟进法。当溶洞无填充物,洞高小于3 m或洞孔高度小于10 m,有部分充填的溶洞或串珠状溶洞时,泥石回填造壁法是最简便、最有效、最经济的办法。

1) 裂隙的判断和处理方案

裂隙会导致桩孔的漏浆、掉石块,甚至卡钻、掉钻、塌孔等事故。施工前应先了解和熟悉地质钻探资料,当发现钻孔水头出现下降时,首先应分析判断场地是存在裂隙还是溶洞。当为裂隙时,孔内水位下降较为缓慢,此时可以做提钻2~3 m处理,然后向孔内

投入粘土、片石，必要时可添加少量水泥。当水头下降速度较快时，可能存在溶洞，可补入泥浆，保证孔内水头压力，待水头稳定后，继续钻进。

2) 泥石回填造壁法

灌注桩一般采用冲孔灌注桩，冲击成孔，当冲至溶洞顶出现漏浆时，可投入粘土、片石，利用钻头冲击，形成由黏土和片石组成的环向稳定的围堰，阻挡泥浆泄漏。对于添加料，在必要时还可掺入少量的水泥、烧碱或锯末，可以增大孔壁（环向围堰）的自稳性。

(1) 泥石回填料材料要求：片石：强度 ≥ 30 MPa，粒径：15~50 cm。

(2) 泥石回填料的比例，片石：粘土按1：1。当掺入水泥时，掺入量为每米2包；当掺入锯末时，掺入量为粘土的10%。

(3) 投入方案：粘土宜采用袋装成包后再掺入；水泥宜采用整袋掺入。投入方案为：片石、粘土袋（可添加水泥、烧碱或锯末等）分层间隔投入，投入回填至溶洞顶板以上1 m处。

(4) 施工要点：

a) 应及时关注钻机的钻进情况、钻机周边区域的地面沉降和钻孔护筒内的水位变化，如果发生漏浆现象，应立即处理。

b) 结合超前钻地质柱状图，当进尺接近溶洞时，应密切观察和检查钻机的工作情况，根据手握冲击主绳的手感、冲击岩层的响声和岩样的情况，判断是否已接近岩溶地层。

c) 当进尺接近岩溶时，应调整主绳的松绳量（可控制在1~2 cm），减少冲程，慢速钻进，否则容易造成突然击穿岩壳和卡钻事故。当钻穿岩溶顶板时，应及时投放片石、粘土，并及时补水保证稳定孔内的水位。

d) 当采用粘土+石块法完成成孔施工，桩孔内泥浆护壁稳定，但浇注水下混凝土易塌孔而造成大量增加混凝土量时，应采取以下措施：在塌孔位置高度另上下各增加1~2 m范围内，在钢筋笼外垫预制砼块，砼块厚度与保护层等厚，再外扎疏眼粗杆钢筋网和密眼钢线网，如图3所示。

2.3 灌注桩充盈系数

岩溶地基桩基充盈系数，比较难以估计，在试桩阶段可根据与施工工艺相适应的实测混

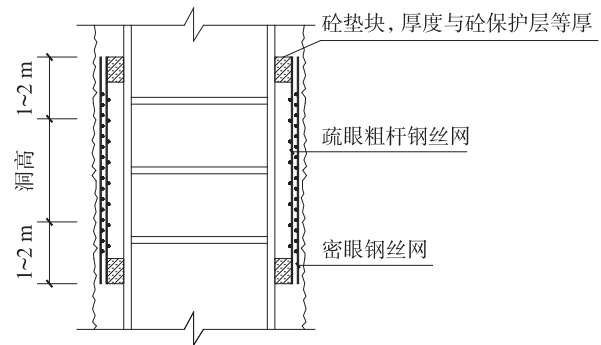


图3 塌孔处防塌钢筋笼处理措施图

Fig. 3 Method for prevent collapse beside reinforcement cage at hole collapsed area

凝土用量以及施工桩基时的井径仪测量数据，计算出灌注桩可能的充盈系数，供施工单位施工时参考，招投标时，按预算定额的规定，不按测定的充盈系数，施工单位报价时，自行考虑充盈系数大于定额规定时的报价。施工中，有施工单位没有采取有效的护壁法及灌注砼时，没有采取防止灌注砼冲击力使原造孔护壁塌陷的措施，使充盈系数急速增大，有时大于2~4倍，其实这已不能用于充盈系数的计算，应属于地基处理的范围。

2.4 岩溶地基上采用预制桩的问题

岩溶地基原则上不宜考虑采用预制桩，这是规范规定的，如一定要采用，可按每桩一孔。对于岩溶地基上桩基施工方法，预制桩目前不宜采用锤击法，较多的是采用静压法。施工时按超前钻柱状图，桩施工进到岩面时，贯入度明显下降，此时即可停止施工，但断桩的风险不可避免，因为桩端可能会落在倾斜的岩面上。比较妥当的方法是桩端设计成不支于岩面的摩擦桩，比柱状图揭示岩面深度提高约1.0 m，但这样桩的承载力将大大降低，需要的桩数会大大增加，经济性也会大大降低。

2.5 施工招标

1) 溶洞处理费

溶洞处理没有具体指导文献、规定，目前根据计算的方法大致有三种：灌浆法；桩基施工时的泥石护壁法；灌浆法+桩基施工泥石护壁法，根据洞高，计算分档洞高的工程量（长度），综合单价因没有定额，根据材料费、施工机械费等综合分析得出分档的综合单价参考值。

2) 灌浆法与泥石护壁法的处理费对比

根据详细勘察及施工勘察各勘察资料估算不同高度溶洞的数量,所有能发生溶洞容积,计算出各分区及全厂的溶洞可能注浆量。

(1) 大唐某燃机电厂,采用注浆法的预算报价,根据注浆单价如下:水泥 600 元/t,机械、人工 90/t,钻孔加套管 80 元/m,由每桩一孔反映的溶洞总遇孔率(即总洞高)情况,综合单价报价为 4 500 元/m。

(2) 在另外一个燃机溶洞处理工程,采用泥石护壁法,综合单价由 4 500 元/m 降至 2 500 元/m。此造价算法:综合考虑平均单位溶洞填土石直径为 3.0 m(即 7 m³/m)。材料:每立方米红粘土 0.5 m³,片石 0.5 m²。红粘土 70 元/m³,片石 100 元/m³。土石混合料 85 元/m³,刚每米填土石价为 85×7=595 元/m≈600 元/m。人工机械:800 元/m。人工+材料=800+600=1 400 元/m。另扣除定额中入岩 1.0 m 不另计列外,增加入岩深度的人工机械费:800~1 000 元/m,综合单价约 2 400 元/m,按 2 500 元/m 考虑。原灌注桩身混凝土的造价与普通桩计算法相同。

因此,从招标费用的角度出发,当可以采用泥石护壁法时,其经济性较优,可以节省近一半的费用。

3 溶洞地基桩基冲孔施工容易出现的问题及应急预案

3.1 卡钻事故处理

卡钻的主要原因是地下溶洞的分布情况不了解,桩基成孔时始终采用高落程冲击,当冲破溶洞顶板岩石时,钻头倾斜,卡在溶洞顶板岩石。当碰到卡钻时,不能强行拉起,防止塌孔、断绳、埋钻,甚至翻机,造成安全事故。防止卡钻的措施和处理方法如下:

1) 根据详细勘察阶段的地质资料和超前钻资料,严格控制冲击钻的冲程,在靠近溶洞顶板 1 m 处宜采用 0.5~1.5 m 的小冲程,轻锤慢打,防止因冲程过长导致卡钻。

2) 若卡在溶洞顶板中部,可以把钻头上下缓慢提落,等钻头松动后再慢慢提起。

3) 若卡在溶洞顶板下部,可以利用钻头由下向上冲击的办法,轻击顶板,将顶板岩石破掉后再提起,也可利用备用的小钻头把成孔位置的顶板岩

石砸碎,再提出钻头。

4) 卡钻时,钻头应上下缓慢提落,并保持泥浆循环,避免钻头长时间停留不动,导致沉渣埋钻。

3.2 埋钻及掉钻事故处理

若发生掉钻事故时,应探明该区域的溶洞情况,并查明施工过程的情况,包括溶洞底的平整度、坚硬度、泥浆溶度和沉渣等情况。若泥渣太厚或泥浆太浓,钻头被埋,无法探测到钻头,则应先进行清孔清渣,然后进行钻头探测,最后再用工具进行打捞;若溶洞底板平整坚硬,能够探测到钻头,则可以采用工具直接进行打捞。

3.3 钻进塌孔处理

对于桩基前未做处理的岩溶地基,塌孔现场常常发生。其原因主要是由于溶洞引起的钻孔漏浆,且泥浆流失过快,无法及时补浆导致的。预防措施是要保证钻机和钻架安装稳定可靠,在进尺距离溶洞顶板 1 m 左右时,采用小冲程钻进,并始终保持泥浆的浓度和水头高度。

出现塌孔时,应及时探明塌孔的位置,并可以采用泥石回填法,投入黏土块、片石(必要时可以灌入 C20 砼)至塌孔位置以上 1~2 m,待孔壁稳定后,再采用小冲程低速钻进,此时,应根据不同的地质土层采取不同的泥浆相对密度,提高泥浆面,及时跟进补充泥浆,保证泥浆面停留在护筒范围内,成孔后应及时进行桩身混凝土的浇筑。对于部分工程,若出现漏浆非常严重的情况,可考虑加长护筒至稳定土层(或岩层)顶面,可以有效防止孔内水位下降过快而导致塌孔。

3.4 钻孔斜孔、偏位处理

钻孔斜孔和偏位发生的情况多数是因为溶洞顶、底板面岩层倾斜、岩层厚度不一或者不平整,导致钻头在钻进过程中出现倾斜。解决方法是可以先提钻,然后回填黏土块、片石(必要时掺入水泥)封底后,再进行纠偏,用钻机小冲程钻进,钻进过程中应做好垂直度观测,确保二次成孔不发生倾斜,若一次不成功,可以进行多次回填纠偏处理。

3.5 重大危险源分析及防止地陷的应急预案

1) 重大危险源分析:地面沉降、钻机倾倒、钻机钢丝绳折断,锤头伤人、触电等。

2) 防止地陷的应急预案:

(1) 对有溶洞的桩位进行钻孔时,应随时观察

孔内泥浆水位变化。

(2) 在场区内和附近房层设置沉降观测点。

(3) 在存有溶洞处储备好物质材料, 以防止孔内水头下降, 出现地陷现象。

(4) 对每一个施工技术工人进行安全技术书面交底。

(5) 专职安全员每天对施工现场进行巡视, 发现事故隐患及时处理。

4 结 论

1) 对塌陷或浅埋溶(土)洞宜采用挖填夯实法、跨越法、充填法、垫层法, 对深埋溶(土)洞宜采用注浆法、充填法、桩基法处理。

2) 对于电厂工程, 岩溶地区的超前钻一般按一桩一孔的布置原则。对于岩溶地基桩基充盈系数, 难以估算, 建议按预算定额的规定招标, 由施工单位自行考虑充盈系数大于定额规定时的投标报价。

3) 在岩溶地基中灌注桩桩基施工中, 结合施工方法及经济对比, 当溶洞洞高小于3 m(无充填物)或洞孔高度小于10 m(有部分充填)的溶洞或串珠状溶洞时, 泥石回填造壁法是最简便、最有效、最经济的办法。当浇注水下混凝土易塌孔而造成大量增加混凝土量时, 可以采用在塌孔位置钢筋笼外侧混凝土垫块外侧增设疏眼粗杆钢筋网和密眼钢线网。

4) 岩溶地基原则上不宜考虑采用预制桩, 如一定需要采用, 建议采用静压法施工, 且桩端设计成不支于岩面的摩擦桩。

5) 针对溶洞地基桩基冲孔施工中出现的卡钻、埋钻、掉钻、塌孔、斜孔等问题给出了处理办法, 并提出了机械准备要求和重大危险源分析及防止地陷的应急预案。

参考文献:

- [1] 李道飞. 岩溶地区溶洞顶板稳定性分析[J]. 河南科技, 2013(18): 48-49. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2013.18.038.
LI D F. Stability analysis of cave roof in karst area[J]. Henan Science Technology, 2013(18): 48-49. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2013.18.038.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: DBJ15-31—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Design code for building foundation: DBJ15-31—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 火力发电厂岩土工程勘察规范: GB/T 51031—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for geotechnical investigation of fossil fuel power plant: GB/T 51031—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.

- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩溶地基基础设计技术规范: DBJ/T15-136—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical code for building foundation in karst area: DBJ/T15-136—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

- [6] 石振明, 沈丹, 彭铭, 等. 岩溶地区桩基施工溶洞处理技术——以吉安永和大桥桩基施工为例[J]. 工程地质学报, 2015(6): 1160-1167. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2015.06.017.

SHI Z M, SHEN D, PENG M, et al. Karst cave disposing technology for pile foundation construction, illustrated with—Yonghe bridge in Ji'an[J]. Journal of Engineering Geology, 2015(6): 1160-1167. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2015.06.017.

- [7] 王康, 孙熔正, 杨新安. 充填型浅层岩溶隧道溶洞处理技术研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3): 23-28. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2018.03.004.

WANG K, SUN R Z, YANG X A. Study on karst cave treatment technology of filling-type superficial karst[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(3): 23-28. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2018.03.004.

- [8] 何正勇. 岩溶地区旋挖成孔灌注桩常见问题及处理措施[J]. 资源信息与工程, 2016, 31(6): 125-126. DOI: 10.19534/j.cnki.zyxygc.2016.06.069.

HE Z Y. Common problems and treatment measures of rotary bored cast-in-place piles in karst area[J]. Resource Information and Engineering, 2016, 31(6): 125-126. DOI: 10.19534/j.cnki.zyxygc.2016.06.069.

- [9] 黄智国. 岩溶地区桩基施工中的溶洞地基处理分析[J]. 西部资源, 2019(4): 97-98. DOI: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2019.04.044.

- HUANG Z G. Analysis of karst cave foundation treatment in pile foundation construction in karst area [J]. Western Resources, 2019(4): 97-98. DOI: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2019.04.044.
- [10] 刘伟. 岩溶区钻孔桩施工溶洞处理研究 [J]. 工程建设与设计, 2019(11): 223-225+228. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2019.06.078.
- LIU W. Study on karst cave treatment in bored pile construction in karst area [J]. Construction & Design for Project, 2019(11): 223-225+228. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2019.06.078.
- [11] 王杨. 岩溶地区桩基施工处理方法 [J]. 工程技术研究, 2017(10): 68-69. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2017.10.039.
- WANG Y. Construction treatment method of pile foundation in karst area [J]. Engineering and Technology Research, 2017(10): 68-69. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2017.10.039.
- [12] 冯健宗, 戚玉亮, 陈帅光, 等. 岩溶区灌注桩施工工艺及质量控制研究 [J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(10): 40-42+70. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2019.10.010.
- FENG J Z, QI Y L, CHEN S G, et al. Study on construction technology and quality control of cast-in-place pile in karst area [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(10): 40-42+70. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2019.10.010.
- [13] 张勇. 岩溶区冲孔灌注桩施工及其溶洞处理措施 [J]. 工程建设与设计, 2018(2): 197-199. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2018.01.193.
- ZHANG Y. Construction of boring cast-in-site pile in karst area and the treatment measures of karst cave [J]. Construction & Design for Project, 2018(2): 197-199. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2018.01.193.
- [14] 廖志钻. 在岩溶极其发育场地进行大直径超长冲孔灌注桩施工的工艺分析 [J]. 建筑施工, 2019, 41(7): 1187-1189. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2019.07.001.
- LIAO Z Z. Process analysis of construction of large-diameter and ultra-long punching pile in extremely developed karst site [J]. Building Construction, 2019, 41(7): 1187-1189. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2019.07.001.

作者简介:



周雷靖 (第一作者)

1943-, 男, 广东汕头人, 教授级高级工程师, 主要从事建筑结构、地基处理设计工作 (e-mail) zhouleijing@gedi.com.cn。

周雷靖

林伟斌 (通信作者)

1982-, 男, 福建龙岩人, 正高级工程师, 主要从事建筑结构、地基处理设计工作 (e-mail) linweibin@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)

