

李强,秦余顺.中老铁路桥梁桩基岩溶处理施工技术研究[J].中国岩溶,2019,38(4):607-611.  
DOI:10.11932/karst20190420

# 中老铁路桥梁桩基岩溶处理施工技术研究

李强,秦余顺

(中国水利水电第十工程局有限公司,成都610072)

**摘要:**依托中老铁路朋松楠松河特大桥岩溶桩基施工,综合工程安全、质量、工期、成本、环境等多方面因素,研究不同发育形态岩溶较适用的处理技术,对比分析抛填黏土片石筑壁法、钢护筒跟进法及两者相结合的处理方法在不同发育形态岩溶处理中的优缺点和适用性,结果表明:对于小型空洞、中型全填充或局部填充溶洞,抛填黏土片石筑壁法可快速、高效、经济地完成溶洞处理;对于中型空洞、大型溶洞、形成较大地下水流通道的溶洞,抛填黏土片石筑壁法与钢护筒跟进法相结合的处理方法有效解决了单个处理措施施工中伴随的工效低、易塌孔、灌注混凝土超方、钢护筒挤压变形等问题,经济、高效地完成了该溶洞处理。根据本研究成果,提出了桥梁桩基岩溶处理较适用的选定原则及控制要点。

**关键词:**中老铁路;桥梁桩基;岩溶;处理措施

**中图分类号:**U445.551 **文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2019)04-0607-05

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

中老铁路是国家“一带一路”倡议重点建设工程,沿线碳酸盐岩广泛分布,岩溶弱—强烈发育,局部地段岩溶地面塌陷现象严重,为易、极易塌陷区,严重影响铁路运营安全。施工过程中频繁遭遇漏浆、塌孔、混凝土超方等系列问题,给施工带来严重的困扰。

前人对岩溶桥梁建设进行了诸多研究,对岩溶塌陷机理开展了定量研究探讨<sup>[1]</sup>;对典型塌陷事件开展了岩溶塌陷演化过程中的水—土—岩相互作用分析<sup>[2]</sup>;对岩溶塌陷进行预测与评价研究<sup>[4]</sup>;阐述了复杂地质段大钻孔桩施工的方案比选和采用的全回转全套管钻机与旋挖机联合施工工作原理和施工方法<sup>[3]</sup>;分析总结了岩溶区桩基施工中出现的涌水、塌孔、卡锤、倒锤、泥浆渗漏等问题;形成了抛填黏土片石筑壁法、钢护筒跟进法、灌注低标号混凝土、注浆加固等多种桥梁岩溶桩基成孔方法。上述研究主要集中在岩溶地面塌陷调查、评价、预测、预警机理和

桥梁岩溶桩基成孔处理措施的研究,处理措施的适用性和桩基成孔后续混凝土灌注超方等经济因素研究尚显不足。中国岩溶发育地区分布很广,桥梁桩基施工过程中经常会遇到复杂多变的岩溶地层,在岩溶区进行桥梁桩基施工是非常困难的,事故多、进度慢、成本高,尚无非常成熟的方法和经验。因此,本文开展桥梁桩基不同发育形态岩溶不同处理措施的对比研究,以期从工程安全、质量、工期、成本、环境等多方面因素选择较适用的处理措施,进一步丰富桥梁桩基岩溶处理技术。

## 1 工程概况

朋松楠松河特大桥位于老挝万荣,桥梁全长2 761.063 m,上部结构为预应力混凝土简支T梁,下部结构单线流线型实体墩,钻孔灌注桩基础,桩径1.0 m和1.25 m两种,桩长6~47 m。桥址区不良地质为岩溶、地震区砂土液化,特殊岩土为松软土。地表溶沟、溶槽、溶蚀洼地等各种岩溶形态发育。桥址区地质勘探钻孔316孔,其中155个钻孔揭示276个

第一作者简介:李强(1980—),男,高级工程师,从事工程建设施工技术与管理工。E-mail:371361696@qq.com。

收稿日期:2019-04-30

溶洞, 钻孔见洞率达 49%; 其中 72.5% 为空洞, 14.5% 为流塑—软塑粉质黏土充填, 7.2% 为硬塑粉质黏土充填, 3.2% 充填砂类土, 1.6% 充填圆砾土。岩溶中等—强烈发育, 最大溶洞高约 12.1 m。

桥址区地表水体以楠松河河水为主, 楠松河为桥区最大的河流, 水量较大, 属常年流水, 受大气降雨补给, 流量随季节及降雨量而变, 旱季水质清澈透明, 雨季水量暴涨而浑浊, 部分沿土层孔隙下渗补给地下水。地下水以土层孔隙潜水和基岩裂隙水、岩溶水为主。灰岩含较丰富的岩溶水, 桥梁处于季节变动带。

典型岩溶发育形态主要有以下四种: I型, 高度 2.5 m 以内小型空洞, 见图 1a; II型, 2.5~5 m 的全填充或局部填充溶洞, 见图 1b; III型, 高度 5 m 以上较大溶洞、串珠状溶洞, 见图 1c; IV型, 形成较大的地下水流通道, 主要分布于楠松河两岸。

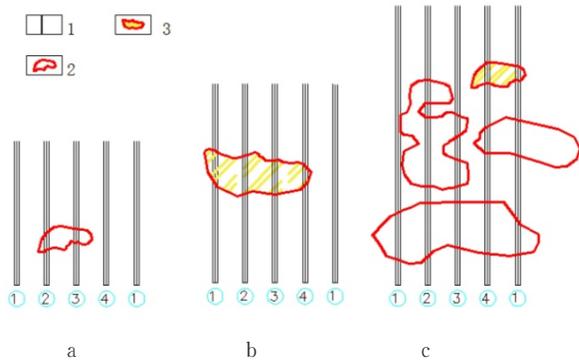


图 1 典型岩溶发育形态图

Fig. 1 Shapes of typical karst caves

1—桩基 2—溶腔 3—填充型溶洞

## 2 岩溶处理技术

岩溶地段铁路桥梁桩基处理措施一般采用抛填筑壁法、钢护筒跟进法、超前注浆填充法、全回转全套管法等。鉴于老挝国内机械设备缺乏, 同时从全线岩溶的溶蚀程度、空腔的大小、经济成本等方面综合分析, 本工程采用了绕避法、抛填筑壁法、钢护筒跟进法及后 2 种方法相结合的综合处理措施。

### 2.1 工艺描述

(1) 抛填筑壁法: 采用冲击钻正常成孔, 当钻穿溶洞漏浆时, 迅速抛填黏土夹片石, 冲孔挤压并挤密溶洞内填充物, 反复回填冲孔, 逐步将溶洞裂隙、空隙填充完全, 直至孔内浆液面稳定, 达到填充溶洞及挤密筑壁效果。

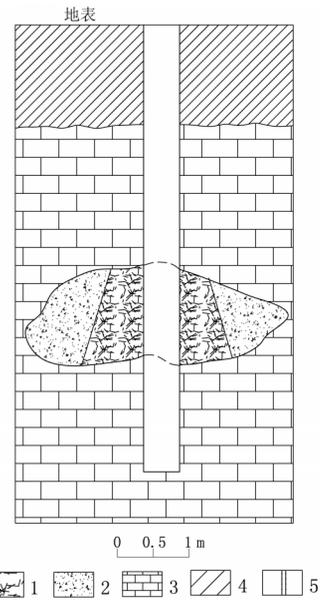


图 2 抛填筑壁法处理示意图

Fig. 2 Sketch showing macadam filling method (wall-building

by throwing and filling clay and rubble)

1—片石黏土堆积体 2—溶洞 3—岩层 4—土层 5—钢护筒

(2) 钢护筒跟进法: 采用冲击钻正常成孔, 待冲孔穿过溶洞底部后, 再接护筒, 并将其锤击或振动下沉至已钻成的孔内或溶洞内, 用以阻断溶洞内流塑充填物或水的流动。

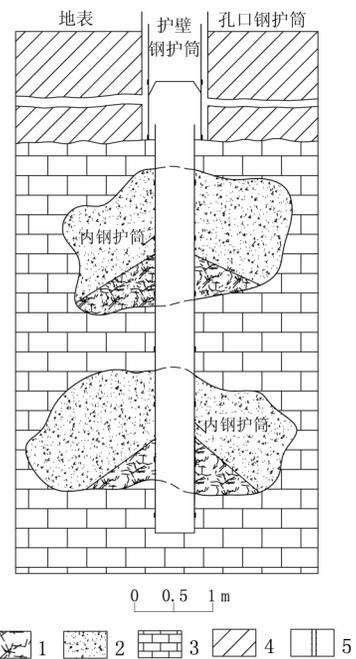


图 3 钢护筒跟进法处理示意图

Fig. 3 Sketch showing steel fence follow-up (steel casing follow-

up) method

1—片石黏土堆积体 2—溶洞 3—岩层 4—土层 5—钢护筒

## 2.2 I、II型溶洞处理

对于此类小型空洞,中型全填充或局部填充溶洞,主要采取了抛填黏土片石筑壁法处理,由于不存在高速水流且溶洞孤立存在,抛填筑壁法可快速、高效、经济地完成溶洞处理。根据实践,反复充填2~5次,可将溶洞填充密实,同时不易塌孔,处理效果好。另外,经与钢护筒跟进法对比,工效相同,经济效益显著。

## 2.3 III、IV型溶洞处理

对于该类较大型、成串珠状的溶洞,或存在地下水联通通道,抛填筑壁法工效低且易塌孔,处理效果不佳;钢护筒跟进法伴随跟进困难,易被挤压变形等缺陷。经反复对比优化,本工程主要采取了两者结合的处理方式。

### 2.3.1 抛填筑壁法特点

(1)工效低、易塌孔 由于处理范围大,需反复充填多次,水头频繁降低,同时受频繁冲击振动影响,极易造成塌孔,或将相邻溶洞壁振穿,甚至引发地表塌陷。本工程前期10根类似桩反复充填处理均达12次以上,49-1#桩达28次,频繁塌孔,用时45d,最后造成地表塌陷,成孔失败。

(2)后续混凝土灌注超方严重 由于黏土及片石自身流动性差,回填扩散范围有限,同时钻头的挤压力也有限,不能将回填料挤压填满整个溶洞,同时因为填充体不密实,后续钻头冲击震动,会使孔口部分黏土、片石松动掉入孔内,使回填区域上部形成通道。后续砼浇筑过程中,由于水下混凝土的高流动性,使混凝土在达到回填区域上部通道时,顺通道绕过回填区流入未被回填到的空腔内,因此就成混凝土的严重超方,见图4。

### 2.3.2 钢护筒跟进法特点

该方法总体表现为跟进困难,易变形。

(1)地质勘探表明,本工程串珠状溶洞居多,洞壁较薄,且伴随斜面岩、凸起块石,大部分钢护筒只能跟进至基岩面顶部,钻头贯穿较薄洞壁及遇到斜面岩、凸起块石时,碰撞造成钢护筒变形。

(2)由于空洞较大、未填充,易引发大范围塌孔,钢护筒受挤压发生弯曲变形。

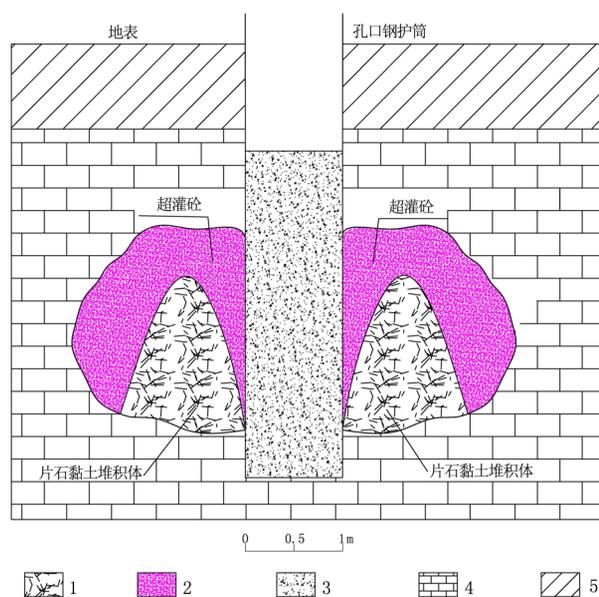


图4 混凝土灌注超方示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing concrete over pouring  
1—片石黏土堆积体 2—超灌砼 3—桩身混凝土 4—岩层 5—土层

### 2.3.3 钢护筒跟进和抛填结合法

结合钢护筒跟进和抛填法的优缺点,本项工程主要采取了少量抛填黏土片石,无需挤压密实,然后快速跟进钢护筒的方法,取得了较好的效果。

(1)钢护筒跟进前抛填黏土片石可钻进冲击磨平斜面岩,避免了钻头碰撞钢护筒;

(2)对空洞进行了填充,降低了大范围塌孔风险;

(3)少量抛填黏土片石,充填1~3次,无需挤压密实,既解决了钢护筒跟进缺陷又避免了反复多次充填黏土片石周期长等缺陷;

(4)对于IV型溶洞,抛填黏土片石时掺加部分袋装水泥,挤压覆盖层与岩石接触段,可快速固结阻断流动水,同时钢护筒迅速跟进彻底封闭地下水流通。

## 2.4 绕避法

合理绕避大中型溶洞,是最优的岩溶处理措施。朋松楠松河特大桥11#墩,施工前钻探表明该处岩溶强烈发育,而小里程侧明显岩溶不发育,结合该桥跨越老挝13#公路的情况,将32 m孔跨改为48 m连续梁,11#墩向小里程方向移动16 m,调整后桩长由34.5 m优化为18.5 m,有效绕避了岩溶强烈发育区,效果显著。

### 3 施工原则及控制要点分析

通过抛填筑壁法、钢护筒跟进及两者结合方法对不同形态岩溶的处理效果的对比分析,从工效、成本

等方面确定岩溶处理措施选定原则和施工注意事项。

#### 3.1 岩溶处理措施选定原则

岩溶处理措施选定原则见下表1。

表1 溶洞处理措施的选定原则

Table 1 The selection principles for karst cave foundation stability of different methods

序号	溶洞高度	填充情况	处理措施
1	2.5 m以内	——	抛填筑壁法:填黏土块和片石
2	2.5~5 m	全填充	抛填筑壁法:填黏土块和片石
		局部填充	抛填筑壁法:填黏土块和片石
		无填充	抛填筑壁法与钢护筒跟进结合法
3	5 m以上		抛填筑壁法与钢护筒跟进结合法
4	有较大水流通道		抛填筑壁法与钢护筒跟进结合法 辅以袋装水泥固结
5	具有绕避条件		绕避法

#### 3.2 施工控制要点

(1)在岩溶地区成桩宜选用冲击钻机,控制的冲能在 $2.5\sim 5.0\text{ t}\cdot\text{m}^2$ 为宜。冲能过小对孔壁裂隙和孔壁周边的溶洞槽挤压能力小,孔壁不够密实,易发生渗漏。同时冲能小破碎能力小,钻孔进尺速度慢。但冲能过大,钻孔通过顶板的速度快,易于卡钻,扩孔现象严重;

(2)岩溶区溶洞、裂隙形态复杂且相互连通,根据岩溶裂隙走向,溶洞的大小、多少、顶板的厚度等地质条件,合理选择开孔顺序。钻孔时要做到先外后内、先大溶洞后小溶洞、先长桩后短桩、桩位之间交叉施工的原则;

(3)加强地质勘探,要对每根桩基的地质状况用地质钻机进行实地详细的了解分析,掌握桩基的地质状况、溶腔的高度、宽度、填充物等情况,经过详细的分析和处理,便于制订具有针对性的施工措施;

(4)对照设计地质资料,当钻至溶洞顶板1 m左右时,用小冲程(1~1.5 m)快频率冲击的方法逐渐击穿溶洞。若孔内无填充物,泥浆面会迅速下降,要迅速往孔内加注泥浆,以保持水头差,防止塌孔。可适当增加泥浆中的黏土数量,泥浆密度提高至 $1.3\sim 1.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,泥浆粘稠度控制在25~30 s。同时提钻至孔口,以防卡钻;

(5)黏土、片石提前备足,漏浆时马上回填,以小冲程反复冲砸,形成泥壁,堵塞洞内通道,防止孔壁坍塌和泥浆流失;

(6)提出钻头后,用装载机配合挖掘机及时将准备好的黏土、片石按1:2的比例抛入。投入量按溶洞竖向高度加2 m以上,当孔内水头稳定时,然后采用低提慢进的方法重新冲孔,通过冲孔挤压并挤密溶洞内填充物,堵住溶洞并重新造浆。使溶洞范围形成护壁后,再继续施工;

(7)提前加工好钢护筒:每节高度1.5 m,护筒内直径比设计桩径+10 cm。钢护筒的加工尺寸必须严格控制,护筒上下节的连接缝除焊接外,还在接缝处焊5 cm宽的加强钢带,护筒水平接缝所成平面与护筒竖向垂直,使整个钢护筒的垂直度符合要求,振动锤与护筒顶面焊接牢固,无松动;并要求振动锤位居护筒顶面中,各节下沉的护筒必须严格控制垂直度;

(8)如原黏土片石未能有效封堵住溶洞,为增加填充物固结强度,降低灌注桩施工时塌孔风险,需要在再投入黏土时分批投放袋装水泥,水泥量以回填深度每米不少于3包,以整袋投入,然后用钻头将水泥袋击破并与黏土片石搅拌均匀。

### 4 结语

岩溶地基的工程危害极大,因此研究岩溶地基的施工问题具有重要现实意义,本文根据中老铁路岩溶发育情况,通过采用绕避法、抛填片石黏土筑壁法、钢护筒跟进法以及与抛填片石黏土筑壁法相结合的施工措施,高效、经济地对不同发育形态的岩溶进行了处理。目前中老铁路朋松楠松河特大桥岩溶

地段桩基施工已全部完成,经超声波检测,桩身混凝土质量均达到 I 类桩要求,所采取措施可行。

### 参考文献

- [ 1 ] 金晓文,陈植华,曾斌,等.岩溶塌陷机理定量研究的初步思考[J].中国岩溶,2013,32(4):437-446.
- [ 2 ] 王建秀,杨立中,何静.岩溶塌陷演化过程中的水-土-岩相互作用分析[J].西南交通大学学报,2001,36(3):314-317.
- [ 3 ] 王飞.复杂地质条件下长大钻孔桩施工控制技术[J].建筑技术开发,2016,43(5):72-73.
- [ 4 ] 程星.岩溶塌陷机理及其预测与评价研究[M].北京:地质出版社,2006:157.
- [ 5 ] 杨家福.岩溶地区钻孔桩施工方案及处理方法[J].北方交通,2007(11):68-69.
- [ 6 ] 范业帅.岩溶发育区桩基施工技术[J].青海交通科技,2017,(2):91-93.
- [ 7 ] 由瑞凯,李芳武,张延河,等.岩溶区大直径钻孔灌注桩施工技术[J].施工技术,2017,42(20):61-64.
- [ 8 ] 付勋勋,刘新社,邵晓州,等.鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶发育程度的分形特征[J].中国岩溶,2017,36(1):23-31.
- [ 9 ] 张琳.针对高速公路岩溶区桥梁桩基的地质勘探研究[J].交通世界,2016(19):80-81.
- [ 10 ] 金广营.武九铁路岩溶地质条件下桥梁桩基钻孔桩施工技术控制[J].建筑机械,2017(5):105-109.
- [ 11 ] 贤良华.基于岩溶地质的桥梁桩基施工方法探讨[J].西部交通科技,2018(10):188-191.
- [ 12 ] 袁广学.基于岩溶复杂地质的高速公路桥梁桩基施工技术研究[J].价值工程,2017(34):131-134.
- [ 13 ] 邓成华.高速公路桥梁溶洞桩基施工技术[J].西部交通科技,2017(9):97-100.
- [ 14 ] 胡胜召.岩溶地桩基施工常见问题分析[J].城市建筑理论研究,2017(22):31-34.
- [ 15 ] 甘展孜.某工程岩溶桩基分析处理[J].矿产勘查,2000(9):16-17.
- [ 16 ] 赵明华,曹文贵,何鹏翔,等.岩溶及采空区桥梁桩基桩端岩层厚度研究[J].岩土力学,2004,25(1):13-14.
- [ 17 ] 邱斌.岩溶地区桥梁桩基设计[J].铁道建筑,2004(5):13-14.
- [ 18 ] 李铁雄,黄振斌,安伟刚,等.岩溶地区桩基特性物理模拟[J].岩土力学,2002,33(4):339-343.
- [ 19 ] 张文学,刘海陆,谢全懿,等.岩溶地区桩基注浆加固效果的影响因素分析[J].铁道建筑,2014(7):28-30.
- [ 20 ] 欧强.岩溶地质条件下桥梁桩基施工技术[J].江西建材,2014(15):14-15.
- [ 21 ] 祁昌旺.岩溶地段桥梁桩基施工技术要点[J].交通世界,2015(Z1):34-35.

## Technologies to deal with karst caves beneath pile foundation of the big bridge on the Laos-China railway

LI Qiang, Qin Yushun

(China Water Conservancy and Hydropower 10<sup>th</sup> Bureau Co., Ltd., Chengdu 610072, Sichuan)

**Abstract** This work studies the techniques to deal problems associated with karst caves beneath the pile foundation of Nam Song bridge in the Laos-China railway. Many kinds of factors are considered such as construction safety, quality, work duration, cost, environment and forms of karst caves. Based on data derive from the construction site, comparative analyses are performed in the strengths and weaknesses as well as practicability of the macadam back-filling method (e.g. wall-building by throwing and filling clay and rubble) and follow-up steel casing method and their combination in dealing with karst caves of various shapes. Results show that for small empty caves and moderate caves fully or partially filled caves, the first method can deal with the karst caves rapidly, efficiently and economically. For moderate empty karst caves, large karst caves and caves with big channels of underground rivers, the combination of the two methods permit to solve the problems during construction such as low efficiency, hole collapse risk, concrete over pouring, and steel casing deformation by extrusion, to overcome the construction risk owing to the karst cave in an economical and efficient manner. Based on these study results, this paper proposes the feasible options and key technologies deal with karst caves beneath bridge pile foundation in karst areas.

**Key words** Laos-China railway, pile foundation under bridge, karst, settlement method

(编辑 张玲)