

# 高岚河特大桥大直径超深桩基岩溶处理实践

文 / 刘飞龙 中铁隧道股份有限公司

**摘要:** 宜昌至兴山高铁作为“八纵八横”高铁网沿江通道的重要部分,其建设对于完善我国高铁网络布局、促进区域经济协同发展意义非凡。该桥作为宜兴高铁的重难点控制性工程,全长1029.8m,最高桥墩124m,主跨为(76.75+4×143+88.75)m连续刚构。该桥地下岩溶广泛分布,给桥梁桩基施工带来了极大挑战。深入研究大直径超深桩基岩溶处理技术,能够为该桥的顺利建设提供坚实技术支持。通过优化施工工艺、创新处理方法,有效解决岩溶带来的施工难题,确保桩基施工质量。合理控制注浆参数,能有效填充岩溶缝隙,提高岩溶周边土体稳定性,保障钻孔施工顺利进行,提升施工效率。

**关键词:** 桥梁桩基; 岩溶处理; 预注浆技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.070

## 引言

针对桩径2.8~3m、孔深达85m以上的超深桩基在强发育岩溶地层中的成桩挑战,如何通过技术创新实现岩溶区桩基的安全高效施工,成为保障大桥建设质量的核心问题。本文基于高岚河特大桥工程实践,系统阐述袖阀管分段双液注浆技术在岩溶处理中的应用,从工艺优化、参数控制、设备选型到效果评估形成完整技术体系,为类似复杂地质条件下的桥梁桩基工程提供可借鉴的解决方案。

### 一、宜兴铁路高岚河特大桥工程概况

#### (一) 桥梁总体设计

该桥位区属中低山峡谷地貌,跨越S312省道及高岚河。桥址跨越S312省道及高岚河。线路斜穿深切U型河谷,沿线路方向,谷底宽约600m,谷底至桥面高100~150m。

#### (二) 地质条件分析

桥址区小里程侧300~500m附近发育有学堂坪断层及盛坪断层。学堂坪断层:断裂切割震旦系灯影组白云质灰岩和寒武系石牌组、水井沱组的页岩地层,断层沿近东西向展布,区内长23km,终端多处被北西向断层切割,东西两段差异大,主要为破碎岩块。盛坪断层:断层破碎带宽约15~20m,可见构造角砾岩,以白云质灰岩为主。受区域内构造运动作用影响,桥址区附近发育有古崩塌堆积体,下伏基岩多较破碎。

#### (三) 岩溶概况

##### 1. 岩溶发育形态及分布规律

桥址区下伏基岩为震旦系上统灯影组(Z<sub>3dn</sub>)白云质灰岩、震旦系上统陡山沱组(Z<sub>3d</sub>)泥质灰岩、炭质页岩,据设计地质钻孔揭露溶隙、岩溶较发育,局部强烈发育。本区属覆盖型岩溶区,地表被覆盖,仅靠钻探揭露,钻孔见洞率为73.53%,钻孔线岩溶率为37.51%。在平面上,岩溶区在桥址区部分墩台有分布,岩溶均为全

充填,充填物主要为灰岩碎块及粉质黏土夹少量碎石土,个别无充填。

##### 2. 岩溶发育强度及地基均匀性

桥址区岩土接触面标高265.53~443.33m,属于岩溶属覆盖型,岩溶发育强度分级属中等~强烈发育,垂直岩溶形态和水平岩溶形态发育。岩溶埋深较深,规模大,且个别连通性较好。场区岩溶覆盖层为圆砾土及碎石土,基岩面附近土体黏结强度易受岩溶水破坏,土颗粒亦随地下水搬运而流失,形成土洞,当土洞发育至一定规模时,在机械震动和真空吸蚀作用下,容易引发地面塌陷。

#### (四) 大直径超深桩基设计参数

该桥143m连续刚构主墩均为群桩设计,除10#墩采用2.8m桩径外其余3个主墩均为3m桩径。主墩所处为岩溶发育区,设计院对每根桩的位置均进行了钻孔,根据钻孔结果桩长从55.5~77.0m不等,加上空桩部分,最深桩基钻孔达到了85m以上,可定义为大直径超深桩基。

### 二、大直径超深桩基岩溶处理方法

#### (一) 常见处理方法概述

目前对于岩溶发育地区的桩基处理多采用注浆填充、钢护筒与注浆结合、旋挖成孔结合片石黏土回填、钻孔桩扩底等方法进行预处理或过程处理,具体适用范围及优缺点如表1所示。

#### (二) 宜兴高岚河特大桥处理方法选择

该桥桩基所处位置岩溶为强发育,岩溶在空间的发育及其复杂。根据地质勘察成果,高岚河特大桥部村基岩溶均为全充填,充填物主要为灰岩碎块及粉质黏土夹少量碎石土,个别无充填。结合设计单位建议的岩溶处理方法,该桥岩溶处理采用施工前注浆预处理岩溶的工艺。

根据专家会确定的施工方案,该桥桩基预注浆处理采用袖阀管分段注浆工艺。

表 1 常用桩基岩溶处理方法对比

序号	施工方法	适用范围	优点	缺点
1	逐桩注浆填充法	用于各种大小的岩溶，尤其是当岩溶内有一定填充物且填充物具有一定渗透性时效果较好。对于灰岩地质，注浆能较好地与灰岩缝隙结合，提高地基整体稳定性。	能够对每根桩基下的岩溶进行针对性处理，有效填充岩溶空间，加固岩溶周围的灰岩地层，提高桩基的承载能力和稳定性。同时，注浆材料成本相对较低，施工工艺相对简单。	施工速度较慢，需要逐桩进行注浆处理，且对注浆工艺要求较高，若注浆参数控制不当，可能导致注浆不密实或浆液流失到其他区域。
2	钢护筒与注浆结合法	适用于岩溶高度较大、岩溶内填充物较少或无填充物，且岩溶顶部岩石较破碎的情况。灰岩地层中岩石破碎带可能较多，钢护筒可起到较好的防护作用。	钢护筒能够有效防止钻孔过程中塌孔和混凝土灌注时浆液流失，同时注浆可以进一步加固钢护筒周围的地层，提高桩基与地层的摩擦力和整体稳定性，适用于较为复杂的岩溶地质条件。	钢护筒的加工和下沉需要一定的设备和技术，成本较高。而且在灰岩地层中下沉钢护筒可能会遇到较大阻力，需要采取相应的辅助措施。
3	旋挖成孔结合片石黏土回填料法	适用于岩溶较小且分布较为密集的情况，对于灰岩地质中一些小型溶蚀孔洞的处理效果较好。	施工速度相对较快，能够利用旋挖钻机的自身特点，边钻进边处理岩溶，不需要额外的大型设备。而且片石和黏土材料来源广泛，成本较低。	对于大型岩溶或岩溶内有水流的情况，处理效果可能不理想。同时，该方法对施工人员的技术水平要求较高，需要根据实际钻进情况及时调整回填料用量和钻进参数。
4	钻孔灌注桩扩底法	适用于岩溶顶板较厚且强度较高，岩溶底部地层稳定的情况。在灰岩地区，若岩溶发育具有一定规律，且符合上述条件，可采用此方法。	通过扩底增加了桩端与地层的接触面积，提高了桩基的承载能力，尤其适用于以端承力为主的桩基。同时，利用岩溶顶板作为天然的承载平台，减少了对岩溶的处理工作量。	对岩溶顶板的要求较高，若顶板厚度不足或强度不够，无法采用此方法。而且扩底施工需要特殊的设备和技术，施工难度较大，成本也相对较高。

### 三、预注浆处理方案

#### (一) 处理目的

1. 在漂石缝隙及破碎岩体裂隙中灌入具有一定粘结强度的材料，改变岩体、黏土间无粘结、散体的状况，提高其抗剪能力，防止在钻孔桩施工时孔壁处的破碎块石塌落、坍塌。

2. 对下部岩溶进行填充，使其具有一定的密闭性和稳定性，在成孔时不漏浆，在灌注时不跑浆，保护成桩质量。

#### (二) 灌浆方法的选取及浆液选用

1. 考虑到需处理的是漂石及破碎板岩，其缝隙、裂隙大小不一，处理目的主要是让浆液渗入并填充这些缝隙及裂隙，起稳固岩块及岩石颗粒的作用，所以采取袖阀管分段式注浆。

2. 同时考虑到浆液的扩散问题，不能太远造成浪费，也不能因为浆量太少而固结效果差，拟采用双液注浆。

#### (三) 注浆方案设计

##### 1. 浆液

采用双液浆。为防止钻孔时因钻头搅动，导致孔周的大型块石塌落。要求浆液固结后有一定的抗剪强度。因此，浆液采用 P042.5 水泥配制，水灰比采用 0.8~1.0。水玻璃与水泥浆配比为 1:0.8。

##### 2. 灌浆范围

(1) 水平范围：为防止漂石、破碎岩体在重力作用下克服注浆加固区的抗剪强度，向孔内滑落，要对整个

桩周范围进行加固。对 10~13 号墩先在整个墩周围布置一排注浆孔，对整个墩起帷幕封闭作用，再对桩位处进行加固。

(2) 竖向范围：根据地质情况，注浆深度不同，采用不同的注浆深度，其较桩基底面标高高低 1m。

(3) 灌浆压力：灌浆压力采用 0.8~1.0MPa。

(4) 灌浆点间距：

根据地质资料，扩散半径按 0.8m 估算。10~13 号墩桩径周围均布置 8 个注浆孔，布置具体注浆孔布置如图 1 所示。

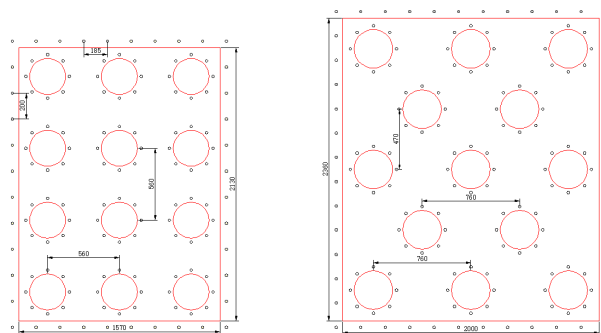


图 1 注浆孔布置 (中铁隧道股份有限公司)

(5) 单孔灌浆量估算：

$$\text{每米用浆量: } V = 0.8^2 \times 3.14 \times 0.15 \times 0.8 \times 1.1 = 0.265 \text{m}^3$$

$$\text{每米水泥用量: 水灰比 } \lambda = 0.8, \text{ 水的密度 } \gamma = 1 \times 10^3 \text{kg/m}^3, \text{ 水泥密度 } \gamma = 3.1 \times 10^3 \text{kg/m}^3$$

$$\text{则: } \lambda = \frac{W_{\text{水}}}{W_{\text{泥}}} = 0.8 \frac{W_{\text{水}}}{1.0 \times 10^3} + \frac{W_{\text{泥}}}{3.1 \times 10^3} = 1$$

则 1 立方米水泥浆水泥用量:  $W_{\text{泥}} = \frac{3.1 \times 10^3}{3.1 \times 0.8 + 1} = 890.8 \text{kg}$

每米水泥用量:  $W_{\text{泥}} = 890.8 \times 0.265 = 236 \text{kg}$

每米水玻璃用量: 水玻璃配合比为: 水玻璃: 水泥浆 = 1: 0.8;

则每米水玻璃用量为:  $0.265 / 0.8 = 0.33 \text{m}^3$ 。

### 3. 设备的选用

注浆施工主要由两大工序组成: 钻孔、灌浆。

(1) 钻孔: 由于本项目注浆加固深度较深, 且需穿过结构松散的漂石和破碎严重的破碎岩体, 钻进时必须套管跟进, 若仍采用传统的岩芯工程地质钻引孔, 则工效太低, 无法满足工期要求。为提高工作效率, 加快工程进度, 拟采用工效极高履带式跟管钻机钻孔。该设备每天可完成 4~6 个钻孔, 钻孔清渣(吹渣)则采用 26/21 型螺杆式高压空气压缩机。

(2) 灌浆: 注浆拟采用高压双液注浆泵, 此设备为双缸双液往复复式注浆泵。

该注浆泵压力大, 可达 0-12MPa。该泵体积小、重量轻、操作简单。在底部岩层部分可加大压力进行劈裂注浆。

### 四、注意事项

① 钻机对位需准确, 就位后必须调平, 确保导向架垂直。

② 钻杆、套管必须连接牢固, 防止在安装、钻进、跟进时脱落。

③ 在施工岩溶部分, 钻杆套管连接要结实, 防止钻具在施工中掉落孔内。

④ 袖阀管应安插在钻孔的中间。花管下口必须堵死, 防止封壳料进入花管。花管的注浆孔间距为 330mm, 开孔后需用橡胶管紧箍, 防止杂物堵孔。

⑤ 套壳料采用低强度水泥粘土浆, 浆液配方为: 水泥: 粘土(膨润): 水 = 1: 1.53: 1.94。

⑥ 待套壳料初凝后(1~2d), 方可插入双向密封的注浆管, 并自下而上进行注浆。注浆过程中, 应通过听声音、看压力、看注浆量判断注浆的实施效果。

⑦ 在注浆压力升高, 并达到设计注浆量时, 注浆管上提。提管应用力均匀, 及时快速, 并提一定的步距。

⑧ 注浆终止需符合以下情况: 注浆压力超过一定值; 灌浆注浆量达到一定要求; 其他地方跑浆。

### 五、注浆加固重点及难点

① 钻孔过程中一定注意安全, 特别是滑移面的稳定性。下雨前把钻机移到安全地带, 下班后把钻机放置平稳。

② 钻进过程中注意岩层的变化, 上部滑移面的深度

等要做好记录。

③ 下部的岩溶部分一定做好记录, 特别是串珠岩溶的深度。在注浆时要有针对性填充岩溶。

④ 由于钻孔需穿透上部完整岩层再进入下部岩溶, 为防止卡钻掉钻, 要求钻进必须连续, 不得中途停止。在有较大岩溶或者串珠岩溶时, 无法返渣, 钻头、冲击器、钻杆等容易掉落, 可能要把上部岩溶处理后, 二次成孔到达下部岩溶。

⑤ 若破碎岩块较大, 填充于裂隙中的水泥浆固结后的抗剪强度不足, 在旋挖钻进过程中, 可能会有少许坍塌。可以根据情况加大注浆量, 增加固结强度的方式来避免。

### 六、岩溶处理效果评估

高岚河特大桥桩基施工前期, 因地层存在松散、裂隙发育等不良地质条件, 导致钻孔施工频频遭遇卡钻、漏浆难题, 严重影响成孔效率与质量。针对此, 施工团队果断采用地层注浆加固技术, 通过将水泥浆液等材料注入地层孔隙与裂隙, 有效填充空隙、压实土体, 大幅提升了地层的密实度与稳定性。加固后, 钻孔施工得以顺利推进, 卡钻、漏浆问题基本消除, 成孔速度显著加快, 施工效率提升约 40%。同时稳固的地层为桩基施工提供了良好条件, 桩体成型质量得到充分保障, 为后续类似工程建设奠定了坚实基础, 也为类似复杂地质条件下的桩基施工积累了宝贵经验。

### 结语

高岚河特大桥大直径超深桩基岩溶处理技术的成功探索, 将为后续类似地质条件下的桥梁工程建设提供宝贵经验与参考范例。对于推动我国桥梁建设技术在复杂地质条件下的创新发展, 提升我国桥梁工程建设的整体水平具有重要意义, 有助于我国在桥梁建设领域保持技术领先地位, 在国际桥梁建设市场中增强竞争力。

在区域经济发展方面, 宜兴高铁的顺利建成离不开高岚河特大桥的高质量建设。通过攻克大直径超深桩基岩溶处理难题, 保障大桥建设质量与进度, 促使宜兴高铁早日通车。这将加强宜昌与兴山及沿线地区的经济联系, 促进区域间资源共享、优势互补, 推动产业协同发展, 带动旅游、物流等相关产业繁荣, 为区域经济增长注入强大动力, 助力乡村振兴与区域协调发展战略的实施。

### 参考文献

[1] 王东东. 岩溶地区桩基溶洞处理技术研究[J]. 四川水泥, 2021.  
 [2] 王欣欣. 岩溶强烈发育地区桥梁桩基溶洞处理方法[J]. 广东土木与建筑, 2024.  
 [3] 陈雅南. 复杂岩溶区高速公路桥梁桩基溶洞施工技术[J]. 中国高新科技, 2023.