

公路桥梁桩基水磨钻人工挖孔灌注桩施工技术

崔世武

中国水利水电第十二工程局有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8581

[摘要] 在我国广阔的版图上，一座座跨越大江大河、连接山川峡谷的公路桥梁正以前所未有的速度和规模拔地而起。这些交通动脉的稳固，始于地面之下数十米深处那些不为人知的支撑——钻孔灌注桩。作为现代桥梁基础的“隐形脊梁”，钻孔灌注桩技术以其卓越的承载性能、良好的地质适应性和相对经济的造价，已成为大跨度公路桥梁基础工程的首选方案。基于此，本文主要对公路桥梁基础施工钻孔灌注桩施工技术进行了研究，希望对有关人员有所帮助。

[关键词] 公路桥梁；基础施工；钻孔灌注桩；施工技术

Construction technology of manual excavation and grouting pile for highway bridge pile foundation using water milling drill

Cui Shiwu

China Water Resources and Hydropower Twelfth Engineering Bureau Co., Ltd

[Abstract] On the vast territory of China, a series of highway bridges spanning major rivers and connecting mountains, rivers, and canyons are rising at an unprecedented speed and scale. The stability of these transportation arteries begins with the unknown supports several tens of meters below the ground – drilled piles. As the "invisible backbone" of modern bridge foundations, drilled pile technology has become the preferred solution for large-span highway bridge foundation engineering due to its excellent bearing performance, good geological adaptability, and relatively economical cost. Based on this, this article mainly studies the construction technology of bored pile for highway bridge foundation construction, hoping to be helpful to relevant personnel.

[Key words] highway bridges; Basic construction; Drilled pile; construction technology

引言

随着我国公路交通网络的不断完善，桥梁工程在跨越河流、山谷及软土地基等复杂地形中发挥着重要作用。钻孔灌注桩作为桥梁的基础承载结构，其施工质量直接关系到桥梁的整体安全与使用寿命。近年来，随着施工技术的进步和工程实践经验的积累，钻孔灌注桩技术已日趋成熟，但在复杂地质条件下仍面临诸多挑战。因此，系统分析钻孔灌注桩施工技术，总结施工过程中的关键控制点，对提高工程质量具有重要意义。

1、研究背景

公路桥梁是交通网络的重要组成部分，其基础工程的质量直接关系到桥梁的稳定性与使用寿命。在山区、岩溶地区、城市密集区等复杂地质条件下，传统钻孔方法（如冲击钻、回转钻）往往面临施工效率低、环境影响大、成孔质量差等问题。水磨钻施工技术利用高压水射流与机械磨削相结合的原理，能够有效克服坚硬岩层、复杂地层的钻孔难题，近年来在桥梁桩基、墩台基础等工程中得到推广。水磨钻工艺具有噪声低、振

动小、无粉尘污染、成孔精度高等优点，尤其适用于对周边环境敏感的城市区域或地质条件复杂的山区桥梁工程，系统分析该工艺的技术特点与应用效果，有助于优化桥梁基础施工方案，提高工程质量与施工安全性，降低工程成本与生态影响。其工作原理可概括为：动力系统驱动中空钻杆及连接其前端的筒状钻头高速旋转（通常转速在200-1000rpm之间），钻头边缘的切削齿在巨大压力和扭矩下，对岩石进行持续的磨削与剪切。同时，持续泵入的冷却水经由钻杆内孔到达钻头工作面，起到冷却钻头、润滑减阻、清除岩粉的三重关键作用。被水流带出的岩粉形成泥浆排出孔外，而未被切割的中央岩柱则形成完整的岩芯。通过连续或间隔的环形钻孔，将待开挖区域的岩石分割成独立块体，再配合楔裂或小型起重设备，即可将岩块移除，形成所需的基础孔洞或槽位。

2、工艺简要说明、工艺特点

水磨钻法主要是通过水磨钻机沿桩径内沿钻若干个孔，孔孔相连，钻孔后取芯，待所有水磨钻钻孔连成一个环后，桩芯

桩壁分离，形成了桩芯的临空面，然后对剩余的桩基岩芯部分进行分块，沿圆半径取芯分块形成内部临空面。在分块的岩石上钻上一排小孔，然后在小孔内锥入钢楔子，捶击钢楔挤压岩石，使岩石同时受到铅锤面上的拉力和水平面上的剪切力作用，当挤压力大于极限抗拉力和极限抗剪切力之和时，岩石沿铅锤面被拉裂并从底部发生剪切破裂，分解成若干小块，利用卷扬机吊出孔外，取出分裂的岩块。依次按照分层取芯、破裂、取岩块的循环工序作用，最终达到成孔的目的。

水磨钻主要由水磨钻机、水磨钻筒和专用水泵三部分组成。一般一个水磨钻机配备 3~5 个水磨钻筒，一个水磨钻筒上有 7 个刀头。

3、公路桥梁基础施工钻孔灌注桩施工技术分析

3.1、施工前勘察与设计

详尽的地质勘察是首要前提。需明确岩层性质、硬度、节理发育情况、地下水状态等，以此确定钻头类型（如金刚石粒度、浓度、胎体硬度）、钻机参数（转速、压力）和钻孔布置方案。设计上，需根据桩径或基坑尺寸，科学规划钻孔的排列方式（如单排环形孔用于小直径桩基，多排密布孔用于大尺寸基坑开挖）、孔距（通常为钻头直径的 0.8~1.2 倍，确保岩石能有效分割）和孔深。

3.2、设备选型与就位

根据岩石硬度、孔径和深度选择合适的钻机型号与功率。设备就位必须稳固、水平，确保钻杆垂直度或设计倾斜度，这是控制成孔精度的基础。采用精密水准仪和测斜仪进行反复校核。

3.3、成孔施工技术

3.3.1、常见成孔工艺及适用性

第一，回转钻机成孔（正循环/反循环）应用最广泛，正循环依靠泥浆泵将泥浆压入钻杆，从钻头底部喷出，携带钻渣沿孔壁上升排出，适用于桩径<1.0m、孔深较浅的桩基。反循环则相反，泥浆从孔口自然流入，通过砂石泵从钻杆中心空腔强力抽吸排出钻渣，排渣效率高，清孔效果好，适用于大直径（>0.8m）、深孔（>30m）的桩基，尤其在土层和软岩中优势明显；第二，冲击钻机成孔利用钻锤重力周期性冲击破碎岩土层，通过掏渣筒或泥浆循环排渣，对卵石层、漂石层、坚硬岩层等复杂地层适应性强，但效率较低，噪声和振动大；第三，旋挖钻机成孔采用全液压驱动，以履带式行走底盘和可伸缩钻杆为特征，通过钻斗的旋转切削和提升直接取土。具有成孔速度快、机械化程度高、噪音小、泥浆用量少、孔壁扰动小等突出优点，在市政及交通干线工程中已成为主流。但对坚硬岩层施工效率会下降，且设备成本较高；第四，全套管冲抓钻（贝诺特法）成孔使用钢管护壁，冲抓斗在套管内取土，能有效防止塌孔，在流砂、厚软土等极不稳定地层中优势显著，且成桩质量高，但施工速度慢，成本高。

3.3.2、井台施工

开挖施工井台，井台除作为施工操作平台外还具有保护井口、承受施工荷载、挡水等作用，井台采用混凝土结构，直径比桩径大 20cm。井台高度 60cm，宽度 40cm，井台顶标高需高出原地面 20~30cm 左右，防止雨水流入。

复核桩中心位置，如果出现偏差，必须在第一节护壁浇筑砼时进行调整，保证第一节护壁的位置准确，以保证桩的位置准确。

3.3.3、护壁施工

一般土层自稳性较差，开挖后，必须进行砼护壁施工。护壁采用的结构形式为内八字搭接，搭接长度不小于 5cm。护壁模板采用定型钢模板，模板由八块组成，模板间用螺栓连接。

渗水量不大的强风化层与中风化及弱风化岩层地层较好，可采用素混凝土护壁支护。

3.3.4、水磨钻开挖

当孔桩开挖进入强风化岩层、中风化岩层时，采用水磨钻施工方法。

（1）钻取孔桩四周岩石：沿桩基孔壁布置取芯点，芯点中心位于设计内径基线上，取芯直径为 170mm，依次以外倾角 15° 向下钻取外周的岩芯，取出的岩芯高约 600mm，外周岩芯取完后中间岩体便形成一个环形临空面。

（2）钻取中间岩石：沿桩半径钻取岩芯，将桩芯岩体等分成三等份，每份占桩芯岩体的 1/3，以便于岩体破裂。

（3）风镐打孔：用风镐在岩体上钻眼，再将桩岩石分成六等份。

（4）插入钢楔，击打钢楔分裂岩石：在沿桩基径向风镐钻出的孔内打入钢楔，用大锤捶击钢楔使岩体获得一个水平的冲击力，在水平冲击力作用下岩石沿铅锤面被拉裂，底部会发生水平剪切破裂，依次分裂岩体，直至该层岩体全部被破裂^[2]。

（5）人工装渣，电动提升机出渣：一次单循环施工作用后，将水磨钻钻出的岩芯进行依次出渣，出渣从桩孔的一侧进行，然后插入钢楔，击打钢楔分裂岩石后再进行一次出渣。

（6）桩孔修正及下一循环的施工：由于水磨钻钻芯后桩基孔壁成锯齿状，为保证有效桩径，要敲掉侵占桩基空间的岩石锯齿。通过锁口护桩在桩孔内标出设计桩中心，检查桩底部偏位情况并及时纠偏，同时标出下一个循环外周水钻钻孔取芯位置，进入下一循环的挖孔桩施工。

3.2.5、挖孔桩终孔检查

当开挖至设计标高后，进行终孔检查。质检人员先进行自检，自检确实达到设计规定标高、桩径、垂直度。孔桩开挖岩层与设计岩层相同，将桩底沉渣清理干净，孔内水抽干后，再及时通知监理，进行终孔检查处。如果入岩深度与设计不符时，需要请设计进行确认是否需要调整桩长的调整。

3.3、钢筋与混凝土施工

成孔验收合格后，工程重点转向地下结构的构筑。钢筋笼作为灌注桩的“筋骨”，其制作与安装精度直接影响桩体的抗

弯、抗剪承载能力。现代化钢筋加工车间内，主筋、加强筋、箍筋通过自动化设备精确弯曲、焊接，形成长达数十米的整体式或分段式钢筋笼。为保证钢筋笼在吊装过程中不变形，需合理设置加强箍筋和临时支撑。吊装入孔时，必须严格控制垂直度，避免碰撞孔壁导致塌方。对于超长钢筋笼，常采用分节吊装、孔口焊接或机械连接工艺，确保连接强度不低于钢筋母材。混凝土灌注则是赋予灌注桩“血肉”的关键工序。目前普遍采用导管法水下灌注工艺：将密封连接的钢制导管插入孔底，通过初灌量计算确保首次灌注后导管埋入混凝土深度不小于1米，随后连续灌注，并随着混凝土面的上升逐步提升导管，始终保持导管埋深在2-6米之间。这一过程的精密控制堪称艺术：灌注中断可能形成断桩；导管埋深过浅可能导致泥浆混入形成夹泥；埋深过深则可能因混凝土流动不畅造成堵管。现代工程已普遍采用超声波检测仪实时监测混凝土灌注高度和扩散形态，配合经验丰富的技术人员，确保数百立方米混凝土在一次连续作业中形成均匀、密实、无缺陷的桩体^[3]。

3.4、水循环与泥浆处理

水磨钻产生大量泥浆水，必须建立有效的循环或处理系统。在环保要求高的区域，需设置沉淀池、泥水分离设备，实现水的循环利用和固体废弃物的合规处置，做到绿色施工。

3.5、质量控制与安全监测

实时监测钻孔的垂直度、孔径、孔深，施工过程中严格控制振动和噪音，但其本身影响已远小于爆破，主要安全风险在于设备用电、高空作业（如需）以及孔内安全，需做好防护和通风。

4、常见质量通病及防治措施

4.1、塌孔与缩径

成因：泥浆性能差（粘度低、失水量大），未能形成有效护壁；孔内水头压力不足；在松散砂层或软塑地层中进尺过快；钻头磨损严重，成孔直径不足。

防治：优化泥浆配比，确保性能指标；始终保持足够的孔内水头高度；在不良地层中低速慢进，必要时可投入粘土块，增加孔壁胶结；定期检查钻头直径，及时修复或更换。

4.2、钻孔偏斜

成因：场地不平整，钻机安装不稳；钻进中遇到探头石或倾斜岩面；钻杆弯曲或接头不同心。

防治：平整压实地面，调整钻机使其水平、对中、垂直；遇探头石时可回填片石后慢速冲过；检查钻具，弯曲的钻杆立即更换。

4.3、断桩与夹泥

成因：灌注过程中导管拔出混凝土面，形成断桩；导管接口不严，泥浆渗入；混凝土初凝时间过短，灌注不连续；混凝土和易性差，发生离析。

防治：严格控制导管埋深，严禁将导管拔出混凝土面；确保导管连接严密，进行水密试验；优化混凝土配合比，确保足

够的初凝时间与和易性；灌注必须一气呵成。

4.4、桩底沉渣过厚

成因：清孔不彻底；钢筋笼下放或下导管时间过长，导致泥浆沉淀；泥浆性能恶化，悬浮钻渣能力下降。

防治：采用有效的清孔工艺（推荐反循环）；清孔后尽快进行后续工序，缩短间歇时间；保持泥浆性能稳定^[4]。

5、施工技术的发展趋势

在“双碳”目标背景下，钻孔灌注桩技术的绿色化转型已成为行业共识。首先是施工过程的清洁化：泥浆循环系统的优化大幅减少了废水排放，分离出的钻渣经固化处理后可作为路基填料再生利用；低噪声钻机、电动旋挖钻机的应用降低了施工对周边环境的干扰；灌注桩废弃混凝土的收集与再加工，减少了建筑垃圾的产生。更为深刻的变革来自材料创新和工艺优化。地质聚合物胶凝材料作为一种新型低碳建材，以工业废渣（如粉煤灰、矿渣）为主要原料，其生产过程碳排放不足传统水泥的20%，且具有早强、耐蚀的优异性能，已开始在灌注桩工程中试点应用。通过优化桩长、桩径、桩距的设计，在满足承载力和沉降要求的前提下，减少混凝土和钢材用量，从源头上降低资源消耗和碳排放。装配式预应力混凝土桩与钻孔灌注的复合工艺，则通过发挥预制桩质量可控、施工快捷和灌注桩承载力高的各自优势，实现综合效益最大化^[5]。

结束语

综上所述，钻孔灌注桩施工技术是公路桥梁基础工程的关键环节，其质量直接影响桥梁的安全与耐久性。本文系统分析了钻孔灌注桩施工的全过程技术要点，包括施工准备、钻孔、钢筋笼安装、混凝土灌注及质量控制等环节。实践表明，只有充分了解工程地质条件，合理选择施工工艺，严格控制每个工序的质量，才能保证钻孔灌注桩的施工质量。随着新材料、新技术、新设备的不断发展，钻孔灌注桩施工技术将更加成熟、高效、环保，为我国公路桥梁建设提供更加可靠的基础保障。

[参考文献]

- [1]梁君升.桥梁钻孔灌注桩施工技术及其在桥梁基础中的应用研究[J].工程机械与维修, 2025, (01): 46-48.
- [2]刘瑞国.钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁施工中的应用[J].工程技术研究, 2024, 9(23): 59-61.D0I: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.23.018.
- [3]李镨.钻孔灌注桩技术在桥梁基础施工中的应用探析[J].城市建设理论研究(电子版), 2024, (31): 126-128.D0I: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202431041.
- [4]谢金波.公路桥梁施工中钻孔灌注桩施工技术的应用分析[J].运输经理世界, 2024, (29): 64-66.
- [5]农定稳, 沈杰.公路桥梁工程的钻孔灌注桩高质量施工技术研究[J].企业科技与发展, 2024, (10): 69-72+90.D0I: 10.20137/j.cnki.45-1359/t.2024.10.002.