

钻孔灌注桩塌孔成因及防治措施探析

王强辉

中国一冶集团有限公司，湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ERA.2026090037

摘 要： 钻孔灌注桩凭借承载力强、适应性广、施工噪音小、基础稳定性好等优势，广泛应用于公路桥梁、市政建筑、水利基建等工程领域。但钻孔灌注桩属于隐蔽地下工程，成孔过程受地质条件、地下水、施工工艺、设备操作等多重因素影响，塌孔病害发生率极高，直接造成桩径不足、桩身缺陷、沉渣过厚、断桩等质量问题，严重制约桩基施工质量与整体结构安全。本文以汇溪二号桥桥梁桩基工程为实际依托，结合项目现场地质、水文、施工工况，系统梳理钻孔施工全过程中的塌孔类型与现场表现，从地质环境、施工操作、泥浆管控、设备管理等方面深度剖析塌孔核心成因，针对性提出适配汇溪二号桥工程现场的精细化防治与补救措施，形成成套可落地的施工管控方案，并为同类复杂地质条件下桩基施工质量控制提供实践参考。

关 键 词： 钻孔灌注桩；塌孔病害；成孔施工；桩基质量；防治措施；工程实例

Analysis on the Causes and Prevention Measures of Borehole Collapse in Bored Piles

Wang Qianghui

China First Metallurgical Group Co.,Ltd. Wuhan, Hubei 430081

Abstract： Drilled pile is widely used in engineering fields such as highway bridges, municipal buildings, and water conservancy infrastructure due to its strong bearing capacity, wide adaptability, low construction noise, and good foundation stability. However, drilled pile is a concealed underground engineering project, and the drilling process is affected by multiple factors such as geological conditions, groundwater, construction technology, and equipment operation. The incidence of hole collapse disease is extremely high, which directly causes quality problems such as insufficient pile diameter, pile body defects, excessive sediment, and pile breakage, seriously restricting the construction quality and overall structural safety of pile foundations. This article is based on the pile foundation project of Huixi No.2 Bridge, and combines the geological, hydrological, and construction conditions of the project site to systematically sort out the types and on-site manifestations of borehole collapse during the entire drilling construction process. It deeply analyzes the core causes of borehole collapse from the aspects of geological environment, construction operation, mud control, and equipment management, and proposes targeted and refined prevention and remedial measures suitable for the Huixi No.2 Bridge project site, forming a complete and practical construction control plan, and providing practical reference for the quality control of pile foundation construction under similar complex geological conditions.

Keywords： drilled pile; collapse hole disease; drilling construction; pile foundation quality; preventive measures; engineering example

引言

随着我国交通与市政基建快速发展，钻孔灌注桩如今是桥梁基础、大型建筑地基的主流基础形式，成孔质量、桩身完整性、桩基承载力这三项核心指标，直接决定着上部结构的稳定性与耐久性。钻孔灌注桩施工工序繁琐，地下作业无法直接观察，不确定因素较多，塌孔是桩基施工中最常出现、危害最严重的突发病害。轻度塌孔会造成孔壁土体脱落、孔底沉渣超标、桩径缩颈，严重塌孔会引发大面积孔壁坍塌、地面沉降、钻机倾斜，使得现场出现废桩返工、工期延误、成本增加的问题。本文以汇溪二号桥桥梁桩基工程为研究载体，该工程位于地层土质复杂，地下水丰富，土体稳定性差，桩基成孔施工很容易出现塌孔问题，施工管控的难度较大。本文围绕这些情况开展塌孔成因分析与防治技术研究，能规范现场桩基施工，规避质量隐患，保障工程保质按期完工。

一、汇溪二号桥工程概况与桩基塌孔现场表现

（一）汇溪二号桥工程桩基施工概况

汇溪二号桥工程是玉溪市跨越玉溪大河的桥梁项目，全桥所有基础都用钻孔灌注桩，一共有78根桩基，有1.2m、1.5m两种桩径，大部分桩长在25m到30m之间。施工区域的地层为典型河湖冲积沉积层，从地表往下依次是素填土层、淤泥质黏土层、粉砂层、粉质黏土层、中风化岩层。表层淤泥质土厚度较大，土质松软，固结性差，中部粉砂层透水性强，地下水储量丰富，土体流动性高，整体地层稳定性很差。本工程采用冲击钻钻机泥浆护壁成孔工艺，施工全程使用原土造浆、循环护壁的方式。复杂地质条件、丰富地下水及现场施工交叉作业，让该工程桩基施工阶段出现不同程度的塌孔问题，这类问题主要集中在粉砂层与淤泥质土层的交接位置，具体表现为局部孔壁脱落、桩身缩颈、孔口塌落、沉渣突增等现象，对桩基成孔质量与施工进度造成较大影响。

（二）汇溪二号桥桩基工程塌孔病害现场主要表现

依据汇溪二号桥工程的现场施工记录，本文确定项目塌孔病害主要分为三类，每类都具备明显的对应地层特征，能直接匹配特定的土层条件。第一类为浅层孔口塌孔，多发生在地表以下2m至5m的素填土与淤泥质土层区域，孔口土体会出现开裂、散落情况，护筒周边也会发生塌陷，护筒埋设不规范、表层土体松散、地表水冲刷是让这类问题出现的主要原因。第二类为中层孔壁局部塌孔，这类问题集中出现在粉砂层区间，成孔过程中泥浆浑浊度会突然升高，悬浮渣土增多，成孔后超声波检测显示局部桩径偏大、孔壁凹凸不平。第三类为桩身缩颈与局部坍塌，主要出现在淤泥质软土层，该类土体遇水后会软化，流变特性明显，护壁效果不足时极易出现土体回缩，造成桩径不足、局部塌落，还会让孔底沉渣厚度瞬间超出标准，给后续钢筋笼下放与混凝土灌注施工带来阻碍。

二、汇溪二号桥桩基工程钻孔灌注桩塌孔核心成因分析

（一）复杂地质与水文条件引发的原生塌孔隐患

汇溪二号桥桩基塌孔，根本原因是地质条件差、地下水活跃，项目场地分布大片淤泥质软土，该土层孔隙较大、含水量高、抗剪强度低，遇水易软化崩解，钻机扰动会快速破坏土体结构，孔壁自稳能力出现较大的下降。场地中部粉砂层结构松散、透水性强，地下水水力梯度大，成孔后孔内外水压失衡，易出现流沙、管涌，直接冲刷孔壁造成砂土脱落、局部坍塌。场地地层软硬分层明显，土层交接面过渡突兀，不同土层渗透性、稳定性差异较大，护壁泥浆难以适配多层土质，易在土层交接处形成薄弱塌孔区，是本项目塌孔集中发生的核心地质诱因。

（二）泥浆护壁管控不规范，护壁承载力不足

泥浆是维持孔壁稳定的核心介质，汇溪二号桥桩基工程前期频繁塌孔，问题根源就在于泥浆管控不佳，项目开工初期，现场直接取原土制作泥浆，没有针对砂层、软土层的特性调整配比。泥浆出现比重偏小、黏度不足、含砂率超标的情况，护壁的压力无法平衡地下水压力和土压力，孔壁土体得不到有效支撑，粉砂层很容易被地下水渗透冲刷，让塌孔出现^[1]。现场还存在泥浆循环不及时、沉淀清理不到位、旧泥浆重复使用等问题，使得泥浆性能持续衰减，护壁效果下降幅度较大。部分桩孔钻进速度过快，泥浆没能及时置换，孔内液面高度不足，孔口液面波动较大，削弱了护壁稳定性，引发浅层、中层塌孔病害。

（三）施工工艺操作不当，人为扰动诱发塌孔

汇溪二号桥桩基工程出现塌孔，主要人为原因是现场施工操作不符合规范要求。第一，部分孔位护筒埋深不足、底部未夯实、周边回填土质松散，使得护筒埋设质量不达标，地表水易渗入孔内，冲刷孔口土体，造成孔口塌落；第二，针对软土、砂土层的钻进作业，未放缓速度，钻机进尺过快、钻头扰动剧烈，这是钻进参数控制不合理的表现，直接破坏孔壁土体结构；第三，钻进过程中钻机晃动偏移，根源在于对位不稳，会对孔壁产生不规则扰动，加剧土体脱落；第四，部分桩孔成孔后未及时下放钢筋笼、灌注混凝土，使得成孔后静置时间过长，孔壁长期处于地下水浸泡环境，土体持续软化失稳，引发后期塌孔^[2]；另外，钢筋笼下放过程中垂直度偏差较大、速度过快，刮蹭孔壁，也多次造成局部孔壁坍塌。

（四）现场管理与设备保障存在短板

工程现场工序交叉频繁，施工班组数量多，设备管控缺乏规范，各类作业环节衔接混乱，会提升塌孔的可能性。部分钻机设备已出现老化，钻头磨损程度深，泥浆泵流量波动大，会让钻进施工状态不稳，泥浆循环时断时续，护壁压力起伏不定，无法构建稳定的护壁体系，在砂层区域钻进时，还容易出现孔壁间歇性掉土、流沙坍塌的情况^[3]。现场技术交底缺乏针对性，之前的交底大多采用通用模板，没有结合本工程上软下硬、砂层集中、地下水活跃的特殊地质条件，施工班组对砂层、软土层这类危险地层的施工要点了解不够，常采用统一的钻进参数，不会根据地层变化动态调整施工工艺。现场巡查机制有缺陷，专职技术人员数量少，没能实时监测泥浆指标、孔内液面高度、钻进速度，大多是事后才开展检查，无法提前察觉塌孔的预兆，孔壁微脱落、泥浆异常浑浊这类小隐患会不断发展成大面积塌孔病害，对成孔质量与施工进度造成不良影响。

三、适合汇溪二号桥工程现场的塌孔精细化防治与补救措施

（一）因地施策，分级优化泥浆护壁体系

汇溪二号桥工程涉及多层复杂地层，本文针对这一情况制定分层分级的泥浆配比与护壁管控方案，从根源上提升孔壁稳定性。施工到表层素填土、淤泥质土层时，使用常规比重泥浆，将

泥浆比重控制在1.10至1.15、黏度控制在18至22s,保障基础护壁效果;进入粉砂层地下水富集区域后,适当调高泥浆比重至1.15至1.20、黏度至22至26s,降低含砂率,增强泥浆的抗渗和护壁承压能力,抵抗地下水压力,避免因流沙、管涌出现塌孔情况。泥浆动态循环制度需严格执行,该项目安排专职试验员每两小时检测泥浆比重、黏度、含砂率三大核心指标,及时置换老化、浑浊超标的泥浆,保证泥浆性能始终稳定。施工全程要让孔内液面比地下水位高1.5m以上,及时补充水和泥浆,避免液面骤降让护壁失效。现场还要设置专用泥浆沉淀池,对循环泥浆开展沉淀净化,避免渣土堆积使得泥浆性能下降,彻底解决汇溪二号桥桩基工程砂层塌孔、孔壁脱落的问题。为了更好地适配本工程高透水砂层地质,施工中额外使用膨润土改良泥浆,和原土造浆相比,这种泥浆胶体率更高、失水量更小,能在孔壁快速形成致密泥皮,封堵砂层孔隙,阻断地下水渗透通道,提升松散砂层孔壁的整体稳定性^[4]。

(二) 规范护筒埋设与成孔钻进工艺

汇溪二号桥桩基工程孔口易坍塌、浅层土体松散,本文优化了护筒施工工艺。施工时统一埋设加长钢护筒,埋深不小于2.5m,直径比设计桩径大30cm,预留充足施工间隙,护筒周边用优质黏土分层回填并夯实,每层夯实厚度控制在20cm以内,阻断地表水渗入的通道,消除孔口渗水、塌陷的隐患。按不同地层设定对应的钻进参数,软土、砂土层施工采用低速稳进、慢进尺模式,钻进速度控制在0.5m/min以内,减少钻机对土体的扰动,禁止快速钻进、强行钻进,岩层区域则可适当提高进尺速度,落实分层差异化钻进要求。成孔作业期间,钻机需保持垂直稳固、对位精准,全程检测其垂直度,防止机身晃动刚蹭孔壁。严格控制成孔后的静置时间,遵循“随成孔、随下放、随灌注”的施工原则,将成孔到灌注的间隔时间控制在4小时以内,缩短孔壁裸露时长,降低土体软化、失稳坍塌的风险。钻机施工前需完成精准找平、地基硬化处理,防止施工时机身沉降、偏移,湖边风大的工况下,要增设钻机临时固定拉结措施,避免风力扰动让孔壁出现破损、局部塌孔的问题。

(三) 规范钢筋笼安装与混凝土灌注工序

考虑到后期工序扰动可能引发塌孔,汇溪二号桥桩基工程对钢筋笼制作、下放、对接的全流程都制定了严格的操作规范,钢筋笼提前在指定区域集中加工,确保整体垂直度、圆度符合要求。下放时保持匀速平稳、垂直居中,速度控制在1m/min左右,严禁出现倾斜偏移、强行下放刚蹭孔壁的情况。对接钢筋笼时采用单面搭接焊工艺,尽快完成焊接操作,缩短在孔口的停留时长,降低孔壁裸露的风险。成孔完成后立刻开展清孔作业,采用二次清孔的方式,第一次清孔去除大块沉渣,下放钢筋笼后再进行一次精准清孔,把孔底沉渣厚度严格控制在5cm以内,清孔符合标准后马上启动混凝土灌注。灌注过程中,要确保导管密封性

良好,埋管深度控制在2m到6m之间,全程保持连续灌注,严禁中途停顿、等待供料,避免孔内泥浆回流、土体再次失稳,防止成孔后到灌注前这段时间出现滞后性塌孔。混凝土灌注前,提前检查导管气密性,防止导管漏水、漏浆,还要提前储备足够的混凝土原料,安排专车不间断供料,确保灌注工序连续完成,彻底避免因工序中断引发的孔壁失稳坍塌隐患。

(四) 塌孔病害针对性现场补救措施

汇溪二号桥工程出现各类塌孔病害后,本文按病害类型分别制定高效补救方案,降低废桩返工造成的损失。对于局部轻微塌孔、孔壁脱落的情况,先回填优质黏土,反复冲捣形成新孔壁,静置沉淀2至4小时后再重新钻进,借助黏土泥浆加固孔壁薄弱部位,恢复孔壁的完整状态。当桩孔位于砂层,出现局部大面积塌孔、流沙严重的情况时,用黏土+片石分层回填封堵,回填高度超出塌孔区间1m以上,分层压实后静置沉淀6小时以上,等土体结构稳定后再低速复钻,重新塑造孔壁结构,切断流沙通道。遇到孔口塌陷病害,马上停下钻进作业,重新夯实护筒周边土体,补填黏土,加高护筒、抬高液面,等孔壁稳定后再恢复施工。该工程塌孔后极易出现沉渣淤积问题,复钻完成后必须开展加强型二次清孔,彻底清理孔底的松散渣土。如果桩孔塌孔严重、桩径超标过多、孔底沉渣无法清理,就直接回填后重新钻进,避免带隐患施工,从源头保证桩基成型质量与后续承载力达标。每一处塌孔处理完成后,都要留存施工影像和处理记录,整理成病害处置台账,给后续同类桩孔施工提供参考,实现从被动补救到主动防控的转变。

四、汇溪二号桥工程施工质量综合保障措施

为落实塌孔防治技术、解决现场病害,汇溪二号桥桩基工程建立覆盖施工全流程的桩基质量保障体系。针对软土、砂层等复杂地层,完成分层专项技术交底,明确泥浆指标、钻进速度、护筒施工、静置时间等关键控制参数,让施工班组精准掌握差异化施工工艺,实现地层变化时工艺同步调整。针对现场施工风险,汇溪二号桥桩基工程建立动态巡检与监测制度,安排专人每日开展泥浆检测、孔内液面观测、地层变化记录,实时预估塌孔风险,提前做出预警并开展处置。为实现施工过程的可追溯性,汇溪二号桥桩基工程建立桩基施工台账,对每根桩的成孔时间、地层情况、泥浆参数、异常问题逐一登记,确保各环节情况可查。针对关键施工环节,汇溪二号桥桩基工程落实关键工序旁站制度,对成孔、清孔、钢筋笼下放、混凝土灌注各环节全程旁站监督,及时纠正违规操作,杜绝人为引发的塌孔隐患。这套涵盖技术标准、管控精细化、巡查常态化的综合模式,能提升汇溪二号桥桩基工程施工稳定性,降低塌孔病害的出现概率,保障整体工程质量达标。

五、结语

复杂地层的桩基施工中，钻孔灌注桩塌孔是常出现的病害，地质水文条件、泥浆管控情况、施工工艺选择、现场管理水平都会影响它的发生，这类隐患藏得深，危害不小。本文以汇溪二号桥桥梁桩基工程为实例，对照现场实际塌孔情况，仔细分析软土砂层交替地层塌孔的主要原因，制定出包含分层泥浆护壁、差异

化钻进、规范工序管控、病害分级补救的整套防治技术。这套技术在现场投入使用后，成功避免了砂层流沙、软土缩颈、孔口坍塌等常见问题，让汇溪二号桥桩基工程塌孔发生率大幅下降，减少返工损耗和工期延误，提升了桩基成孔合格率与施工效率。经过实际应用验证，契合场地地质特征的精细化防控措施，能从根源上避免塌孔隐患，提升隐蔽工程施工质量，还能为同类软土地区钻孔灌注桩施工提供可靠的实践经验与技术参考。

参考文献

- [1] 李煜彪,陶禹州,卢健,等. 钻孔灌注桩护壁泥浆配合比设计与孔壁模拟分析 [J]. 工程勘察, 2026, 54 (7) 37-43. DOI:10.26923/j.gckc.2026.07.006.
- [2] 李增辉. 高速公路桥梁钻孔灌注桩施工关键技术探究 [J/OL]. 中国建筑知识仓库, 1-6[2026-07-10]. <https://doi.org/10.27003/j.cnki.jhhs.20260616.008>.
- [3] 孙苏. 钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁施工中的运用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2026, (17) 93-95. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202617031.
- [4] 马凤雪. 兰州地铁深厚填土层灌注桩施工工艺研究 [J]. 土工基础, 2026, 40 (3) 410-414.