

复杂环境下大直径转换柱桩柱一体施工关键技术研究与应用

欧平

广州市政园建设管理有限公司，广东广州，510000；

摘要：在城市建设向复杂地质与密集空间推进的背景下，基础工程施工面临严峻挑战。本文以康王路下穿流花湖隧道安置房项目为依托，聚焦大直径转换柱“桩柱一体”施工工法实践中的技术瓶颈，深入剖析原设计方案存在的核心问题，最后通过设计优化与施工工艺创新，提出相关的技术措施，希望能够为类似复杂环境下的基础工程施工提供一定的理论参考与实践借鉴。

关键词：转换柱；桩柱一体；加劲箍；水下自密实混凝土；施工技术；质量风险

DOI：10.64216/3080-1508.25.11.016

引言

在复杂环境下（如密集建筑群、特殊地质条件、有限施工空间等），大直径转换柱（直径通常大于 1500mm）采用“桩柱一体”施工时，受设计方案合理性、施工工艺适应性等因素影响，易出现钢筋笼稳定性不足、混凝土浇筑质量难以控制等技术难题，不仅影响工程进度，更对结构安全构成重大隐患。

康王路下穿流花湖隧道安置房项目在隧道上盖，且其工程桩兼做隧道基坑的围护桩（下称“转换柱”），对施工技术提出极高要求。该项目转换柱设计直径达 2000-2200mm，采用“桩柱一体”施工工法，在施工准备阶段即暴露出原设计方案的诸多缺陷，亟需通过技术创新提出针对性解决方案，确保工程顺利实施。

1 转换柱一次性施工存在的关键技术问题

康王路下穿流花湖隧道安置房项目大直径转换柱原设计方案在推进“桩柱一体”施工时，因设计阶段未充分考虑施工可行性，导致一系列技术问题凸显，具体如下：

1.1 钢筋笼稳定性与吊装可行性问题

钢筋笼作为转换柱的受力骨架，其制作精度与吊装稳定性直接决定转换柱的结构性能。原招标图纸中，转换柱钢筋笼设计未设置加劲箍，仅依靠纵筋与箍筋的绑扎连接形成骨架结构，该设计存在明显缺陷，引发一系列问题：

从结构稳定性来看，转换柱纵筋数量多（直径 2000-2200mm 的转换柱纵筋数量通常超过 30 根）、长度长（单根纵筋长度可达 15-20m），加劲箍的缺失导致纵筋无法形成稳定的空间受力体系，箍筋安装过程中纵筋

易发生偏移、倾斜，难以保证纵筋的间距与垂直度符合设计要求。同时，钢筋笼整体刚度严重不足，在地面整体加工成型后，自重可达 10-15t，吊装过程中受重力与吊点受力不均影响，极易发生扭曲、变形，甚至出现纵筋与箍筋脱开的情况，不仅无法满足设计规定的钢筋定位精度（要求纵筋位置偏差不得超过 5mm，箍筋间距偏差不得超过 10mm），更存在重大安全风险，若吊装过程中钢筋笼坠落，可能造成设备损坏、人员伤亡等事故。

1.2 导管活动空间不足引发的成桩质量风险

1.2.1 清孔不彻底

“桩柱一体”施工中，成孔后需通过导管进行二次清孔，以清除桩底沉渣，保证桩端承载力。原设计中导管活动空间受限，导管仅能在钢筋笼中部小范围移动，无法覆盖桩底整个截面，尤其是孔口范围外的桩底区域，沉渣无法有效清除，导致桩底沉渣厚度超过设计允许值（设计要求沉渣厚度 $\leq 50\text{mm}$ ）。沉渣过厚会大幅降低桩端承载力，在后期结构使用过程中可能出现桩体沉降，影响上部结构安全。

1.2.2 导管拔管困难

混凝土浇筑过程中，导管需根据混凝土浇筑高度逐步提升、拔出。由于导管活动空间狭小，钢制导管在混凝土流动推力作用下易发生晃动，与密集的箍筋发生碰撞、卡顿，严重时导管被箍筋卡死，无法正常拔管。若强行拔管，可能导致导管断裂，混凝土中断浇筑，形成断桩；若无法拔出导管，需将已浇筑的混凝土与钢筋笼全部清除，重新施工，造成大量的材料浪费与工期延误。在项目试施工阶段，曾出现 2 次导管卡顿情况，虽通过调整吊机力度与导管位置勉强拔出，但已对混凝土浇筑

连续性造成影响,且增加了施工风险。

1.2.3 混凝土离析

混凝土浇筑过程中,需依靠自身流动性填充钢筋笼内部空隙,形成密实的桩体结构。原设计中箍筋间距过小,混凝土流动阻力大幅增加,骨料(石子)与砂浆无法同步流动,出现骨料堆积、砂浆分离的离析现象。离析后的混凝土成型后,桩身易出现蜂窝(骨料之间空隙未被砂浆填充)、麻面(表面砂浆不足,露出骨料)及孔洞(局部区域无混凝土填充)等缺陷,经检测,试施工桩体的混凝土密实度合格率仅为 75%,远低于设计要求的 95%以上,且混凝土强度平均值较设计值(C50)低 8-10MPa,严重影响桩身的力学性能与耐久性。

2 解决方案与关键技术措施

2.1 设计优化措施

设计优化是解决“桩柱一体”施工难题的基础,通过调整钢筋笼构造形式,在保证结构受力性能不变的前提下,提升施工可行性,主要措施如下:

2.1.1 增设加劲箍

根据转换柱钢筋笼的尺寸与受力特点,在钢筋笼中系统性增设加劲箍,具体设计参数如下:

加劲箍材料:采用 HRB400E 级钢筋,直径为 20mm,与纵筋材质、强度等级匹配,确保整体受力协调;

加劲箍布置间距:沿钢筋笼长度方向,每 2m 设置一道加劲箍,对于钢筋笼端部(上下各 1.5m 范围),加密至每 1m 一道,以增强端部刚度,避免吊装过程中端部变形;

加劲箍连接方式:加劲箍与纵筋采用双面焊接连接,焊缝长度不小于 10d(d 为加劲箍钢筋直径),焊接质量等级为二级,确保连接牢固,避免受力脱开。

通过增设加劲箍,钢筋笼形成稳定的空间框架结构,整体刚度显著提升。经结构力学计算验证,优化后的钢筋笼在自重作用下的最大挠度由原设计的 150mm 降至 30mm,满足吊装挠度限值($\leq 50\text{mm}$)要求;同时,纵筋的定位精度大幅提高,纵筋间距偏差可控制在 3mm 以内,箍筋安装时无需反复调整。

2.1.2 优化箍筋布置形式

在保证设计要求的体积配箍率(原设计体积配箍率为 0.8%)不变的前提下,对箍筋布置形式进行优化,核心思路是扩大钢筋笼中部的有效孔径,为导管活动提供充足空间,具体优化方案如下:

箍筋分段布置:将钢筋笼沿截面径向分为内、外两层,外层箍筋保持原设计的密排布置(间距 100-150mm),确保钢筋笼外围的抗剪性能;内层箍筋采用间隔布置,间距调整为 300mm,且内层箍筋仅在钢筋笼上下两端(各 2m 范围)连续布置,中部区域每隔一道内层箍筋设置一道“十字形”支撑筋(采用 16mm HRB400E 钢筋),替代原有的连续箍筋;

有效孔径调整:通过上述优化,钢筋笼中部的有效孔径由原设计的 200-330mm 扩大至 600mm,远大于混凝土导管直径(250-300mm),导管可在中部区域自由升降、移动,完全满足清孔与浇筑需求;

受力性能验证:采用 PKPM 结构计算软件对优化后的钢筋笼进行受力分析,结果表明,体积配箍率仍保持 0.8%,钢筋笼的抗剪承载力、抗扭承载力与原设计基本一致,满足结构设计要求;同时,通过足尺模型试验验证,优化后的钢筋笼在水平荷载作用下的位移值与原设计相比,结构稳定性未受影响。

2.2 施工工艺创新

在设计优化的基础上,通过创新施工工艺,解决成孔质量控制、混凝土浇筑等实操难题,确保“桩柱一体”施工顺利实施,主要创新工艺如下:

2.2.1 应用长护筒护壁技术

针对项目场地地质条件复杂(上部为填土、淤泥质土,厚度 5-8m,稳定性差,下部为强风化、中风化岩层),成孔过程中易出现孔壁坍塌、沉渣增多的问题,采用长护筒护壁技术,具体施工要点如下:

护筒参数设计:护筒采用 Q235B 级钢板卷制而成,壁厚 20mm,内径比桩径大 30cm(即转换柱直径 2000mm 时,护筒内径 2300mm;直径 2200mm 时,护筒内径 2500mm),护筒长度根据地质勘察资料确定,确保下放至强风化或中风化岩层面,下放深度通常为 8-12m;

护筒安装工艺:采用旋挖钻机配合振动锤进行护筒安装,首先用旋挖钻机钻至护筒设计深度的 1/2,然后将护筒吊入孔内,通过振动锤将护筒振动下沉至设计标高,护筒顶面高出地面 300mm,防止地表水流入孔内;护筒安装完成后,对护筒垂直度进行检测,垂直度偏差控制在 1%以内,避免因护筒倾斜导致钢筋笼安装偏移;

护壁效果:长护筒有效隔离了上部不稳定土层,成孔过程中孔壁坍塌率由原设计的 25%降至 0,同时减少了土体塌落产生的沉渣,二次清孔后的桩底沉渣厚度可

控制在 30mm 以内,远低于设计允许值,为后续混凝土浇筑奠定了良好基础。

2.2.2 采用水下自密实混凝土 (SCC)

针对密集配筋导致混凝土流动困难、易离析的问题,将普通水下混凝土 (原设计为 C50 水下混凝土) 优化为 C50 水下自密实混凝土,利用自密实混凝土的高流动性、抗离析性与良好填充性,解决浇筑质量难题。

(1) 混凝土配合比设计

根据《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283-2012) 要求,结合转换柱施工特点,设计 C50 水下自密实混凝土配合比,关键参数如下:

胶凝材料用量:水泥 (P·O 42.5R) 用量 380kg/m³,粉煤灰 (I 级) 用量 120kg/m³,矿粉 (S95 级) 用量 100kg/m³,总胶凝材料用量 600kg/m³,确保混凝土具有足够的强度与流动性;

骨料选择:粗骨料采用 5-20mm 连续级配碎石,针片状颗粒含量 ≤5%,含泥量 ≤1%,以减少骨料间的摩擦阻力;细骨料采用中砂,细度模数 2.6-2.8,含泥量 ≤2%,确保砂浆具有良好的包裹性;

外加剂:采用聚羧酸系高性能减水剂,减水率 ≥30%,掺量为胶凝材料总量的 1.2%,同时复配适量的引气剂 (掺量 0.01%),改善混凝土的抗离析性与耐久性;

水胶比:控制在 0.32,坍落度扩展度 ≥750mm,扩展时间 (T500) ≤5s,确保混凝土具有极高的流动性,能够在无需振捣的情况下自行填充钢筋笼间隙。

(2) 混凝土性能验证

通过试验室试验对 C50 水下自密实混凝土的性能进行验证,结果表明:

工作性能:混凝土出机坍落度扩展度为 780mm,静置 30min 后扩展度仍保持 720mm,无明显泌水、离析现象,满足密集配筋的浇筑需求;

力学性能:标准养护 28d 后,混凝土立方体抗压强度平均值为 58.6MPa,轴心抗压强度平均值为 46.2MPa,弹性模量为 3.5×10^4 MPa,均超过 C50 混凝土的设计要求;

耐久性能:混凝土抗渗等级为 P8,抗冻等级为 F200,氯离子扩散系数 $\leq 1.0 \times 10^{-12}$ m²/s,满足地下工程的耐久性要求。

(3) 混凝土浇筑工艺

为确保水下自密实混凝土浇筑质量,制定专项浇筑

工艺:

导管布置:采用直径 300mm 的钢制导管,导管底部距桩底 300-500mm,导管连接采用法兰盘连接,确保密封严密,防止漏水;

浇筑顺序:混凝土浇筑采用“分层浇筑、连续推进”的方式,首批混凝土浇筑量确保导管埋入混凝土深度 ≥1.0m,后续浇筑过程中,导管埋入深度控制在 2-6m,避免导管拔出混凝土面导致断桩;

浇筑速度:控制混凝土浇筑速度为 30-40m³/h,过快易导致混凝土离析,过慢易导致混凝土初凝;同时,通过导管上下小幅移动 (移动幅度 ≤500mm),辅助混凝土流动,确保填充密实;

质量检测:浇筑过程中,每浇筑 50m³ 混凝土制作 1 组混凝土抗压强度试块,共制作 6 组,28d 后检测试块强度,合格率 100%;浇筑完成后,采用超声波检测对桩身完整性进行检测,检测结果显示,桩身完整性等级均为 I 类,无蜂窝、麻面、孔洞等缺陷,混凝土密实度优良。

3 结束语

本研究以康王路下穿流花湖隧道安置房项目为依托,针对复杂环境下大直径转换柱“桩柱一体”施工的关键技术难题开展研究,尽管本研究取得了阶段性成果,但仍存在进一步深化与拓展的空间,未来可通过促进智能化施工技术融合并加强对新型材料的应用研究从而进一步提升混凝土的强度与耐久性,适应更复杂的工程环境,总而言之,通过持续的技术研究与创新,有望进一步完善大直径转换柱“桩柱一体”施工技术体系,推动基础工程施工技术向更高质量、更高效率、更智能化的方向发展。

参考文献

- [1] 陆巍. 既有建筑增设地下空间结构转化桩柱一体施工技术研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(7): 1035-1038. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2024.07.011.
- [2] 龙莉波, 郑七振, 章谊, 等. 桩柱一体结构环梁节点力学性能试验研究[J]. 建筑施工, 2023, 45(1): 1-6. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2023.01.001.
- [3] 戚健文, 王佳玮. 第 4 代逆作法一柱一桩垂直度检测仪器的研发[J]. 建筑施工, 2023, 45(2): 238-241. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2023.02.002.