

桥梁桩基钢筋笼定位精度对桩身完整性的影响及施工控制要点

张顺坤

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 乌鲁木齐 830021

【摘要】：在深水、软土和岩溶复杂地层条件下，桥梁桩基钢筋是将上部结构荷载传递到深部的主要桥梁，也是地震、冲刷和船撞等多重灾变链条的第一道防线。钢筋笼是桩身混凝土“骨架”，它的空间位置直接影响着钢筋笼的尺寸、纵横配筋率和截面抗弯刚度，一旦定位不准，易导致钢筋锈胀、混凝土环向开裂、抗侧约束弱化，进而出现缩径、夹泥、断桩等缺陷，弱化桩-土的协同工作性能。因此，将其定位精度控制由“允许误差”提升到“完整性前条件”，已成为解决超长直径嵌岩桩施工中的关键技术难题。

【关键词】：桥梁桩基；钢筋笼定位精度；桩身完整性；影响；施工控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.03.036

传统的质量观主要关注钻孔垂直度和混凝土强度，缺乏对钻孔内钢筋笼真实状态的在线监测手段，造成“隐蔽工程”隐患的滞后暴露。随着轴载的提高和服役年限的日益严格，设计中对桩身的耐久性提出了mm级的保护层要求。桥梁桩基钢筋笼定位精度对桩身完整性的影响及施工控制要点研究，不仅可以丰富桩基础损伤演化理论，而且可以为智能沉桩装备的智能化及闭环控制提供决策边界。因此，研究桥梁桩基钢筋笼定位精度对桩身完整性的影响及施工控制要点，为当前相关行业热议课题。

1 钢筋笼定位精度与桩身完整性的关联机理

1.1 钢筋笼定位精度的核心评价维度

桥梁桩基础钢筋笼的定位精度是指钢筋骨架在桩身三维空间中与设计位置的匹配度，其核心指标包括：平面位置偏差、垂直偏差和保护层厚度偏差。平面位置偏差是指钢筋笼轴线与桩孔中心轴线之间的水平位移，它直接影响到桩身的受力均匀性，如果偏离规范要求，容易造成桩身局部应力集中；竖向垂直偏差反映了钢筋笼轴线与孔轴的倾角，决定着桩身纵向传力的连续性^[1]。保护层厚度偏差是保证钢筋抗腐蚀能力和桩身耐久性能的重要指标，厚度偏小或偏厚都会引起结构缺陷。这三个指标构成一个相互关联的精度控制系统，任何一个指标的异常都有可能導致桩的完整性问题。

1.2 定位偏差对桩身完整性的影响机制

平面位置偏差过大，容易造成钢筋笼的偏心布置，在桩身截面上形成“应力薄弱点”和“过载区”。当变量大于50mm（规范允许值）时，钢筋笼一方保护层厚度可能低于设计值60%，甚至出现露筋现象，这一区域混凝土易因锈蚀膨胀而出现纵向裂缝。如果保护层厚度过大（大于120mm），由于混凝土收缩系数的不同，会产生贯穿裂纹，从而破坏桩身结构的完

整性。当竖向垂直度偏差超过1%时，钢筋笼将部分粘附于孔壁，混凝土灌注过程中不能充分包覆钢筋，形成“脱空区”、“夹渣层”，使桩身抗剪承载力降低20%以上，且易诱发疲劳破坏。

保护层厚度偏差是一种隐蔽而长期的影响，当保护层厚度小于80%时（小于设计值80%），钢筋锈蚀起始时间缩短，且在地下水和氯离子等腐蚀环境下，腐蚀产物体积膨胀可达3-4倍，造成保护层脱落，形成桩身空洞^[2]。保护层厚度过大，桩身有效承载截面减小，厚保护层混凝土易因水化热释放不均匀而产生内部微裂纹，并在荷载-环境耦合作用下逐渐扩展，最终影响桩身完整性。此外，定位偏差也会破坏钢筋-混凝土界面粘结性能，当间隙大于0.2mm时，粘结强度将降低35%以上，不能实现协同工作，造成桩身内力传递混乱，增加结构破坏风险（定位偏差与桩身完整性影响对应如表1）。

表1 定位偏差与桩身完整性影响对应表

定位偏差类型	偏差阈值	桩身完整性缺陷表现	性能衰减幅度
平面位置偏差	>50mm	纵向裂缝、应力集中	承载力降15%+
竖向垂直度偏差	>1%桩长	脱空、夹渣	抗剪性降20%+
保护层厚度偏差	<80%设计值	钢筋锈蚀、保护层剥落	耐久性降50%+

2 钢筋笼定位偏差的核心影响因素分析

2.1 设计与材料因素

不合理的设计参数是造成定位偏差的根源。钢筋笼劲箍布置间距过大（2.5m以上），将导致框架整体刚度不足，吊装和下吊时容易产生“灯笼形”变形，引起平面位移。主筋和加劲箍的焊接节点设计不合理（如焊缝长度小于10d，d为主筋直

径)和焊接高度不足(小于0.3d),将导致节点的抗拉强度不足,且在下放过程中容易发生加劲箍脱落,影响结构稳定。如钢筋屈服强度在 $\pm 15\text{MPa}$ 以上的波动范围内,将导致结构变形不均匀,由于定位垫强度不足(C40以下)或耐久性差,受泥浆浸水和混凝土侧压影响,容易发生破裂而丧失保护层厚度调控功能。

2.2 施工工艺因素

不规范的施工流程是造成定位偏差的重要原因。如果用普通水准仪测高(误差 $\pm 3\text{mm}$)或不做护桩检查,则钢筋笼的定位标高偏差在 $\pm 50\text{mm}$ 以上,若成孔质量差,如孔壁倾斜度大于1%,孔径不规则(局部减径或直径大于10%),将导致钢筋笼下放过程中受到不均匀阻力,从而引起垂直度偏差。采用单吊点吊装长钢筋笼(长度大于25m)和快速提升(大于1m/s)的吊装工艺不合理,容易造成框架弯曲变形^[3]。在下放过程中,由于不能对垂直度进行实时监测,只能依靠肉眼观测,很难及时发现微小的偏差,从而造成较大的偏差。

混凝土灌注过程中的扰动进一步加剧了定位误差,当灌注速率过快时(大于6m/h),将产生20kPa以上的侧压,将钢筋笼推向上浮或水平位移;如果导管埋设深度不合适(小于1.5m或大于6m),将导致导管在提升过程中与钢筋笼发生碰撞,导致定位夹具的损坏。当泥浆比重大于1.2或含砂量超过4%时,将导致钢筋笼下放阻力增大,泥浆颗粒易粘附于钢筋表面,形成“泥膜”,影响钢筋-混凝土粘结性能,间接降低桩身完整性。

2.3 环境与设备因素

定位精度受施工现场环境条件的影响较大,工程地质条件复杂,如厚层(含水量大于35%)软粘土(含水量大于35%)、砂卵石层(颗粒含量大于30%),极易造成钻孔缩径、塌孔,导致笼下轨迹偏移。由于场地不平(坡度大于3%)和钻机水平(水平度偏差大于0.5%),容易引起钻孔倾斜,从而造成钢筋笼轴线与孔轴不对齐。强风(6级以上)和暴雨(日降雨量 $>50\text{mm}$)将影响吊装工作的稳定性,并增大钢筋笼撞击孔壁的风险。夜间施工照明不足(50lux以下),将影响测量放样精度和偏差校正精度。

施工机械的性能不够好,直接影响到定位控制的效果。全站仪测距误差大于 $\pm 2\text{mm}+2\text{ppm}$,水平仪高程误差大于 $\pm 1.5\text{mm}/\text{公里}$,测量仪器精度达不到要求。钻机钻进系统的稳定性较差,主要表现在钻杆垂直度调整精度不够(误差大于 0.1°),扭矩调节范围在 $\pm 5\%$ 以上,易造成孔壁不平整。吊装设备吊装精度不高,如小车吊变幅误差大于 $\pm 100\text{mm}$,卷扬机钢丝绳的收放速率不均匀(波动大于 $\pm 0.2\text{m/s}$),容易引起钢筋笼吊装过程中

的横向摆动,引起平面位移。

3 钢筋笼定位精度的精细化施工控制要点

3.1 设计优化与钢筋笼制作精度控制

对设计参数进行优化是提高定位精度的前提。优化加劲箍布置间距1.5~2.0m,钢筋笼两端5m内加密至1.0m,采用双肢加劲箍(由2根 $\angle 100 \times 8$ 角钢构成)加强框架的抗力。主筋和加劲箍焊接节点采用“双面角焊缝”设计,焊缝长度不少于10天,焊足不少于0.3天,保证节点抗拉强度不低于主筋的90%。钢筋笼的制作精度要求为:主筋间距不超过 $\pm 10\text{mm}$,加劲箍垂直度不超过1mm/m,骨架直径不超过 $\pm 10\text{mm}$,全长不超过 $\pm 50\text{mm}$ 。

采用工业化生产工艺,提高钢筋笼的精度。引进钢筋笼焊机规范生产,保证主筋间距均匀,设备定位精度控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。加劲箍采用数控裁切设备加工,避免手工裁断引起的尺寸偏差。制作完成后要做的“三维检测”,即用全站仪检查骨架的垂直度,用激光测距机检查钢筋间距,用专用游标卡尺测量保护层的厚度(误差不大于 $\pm 2\text{mm}$)^[4]。采用C40微膨胀混凝土(膨胀率0.02%-0.03%)制作的“复合定位垫块”,内置钢丝网增强抗裂性,按梅花形布置,纵向间距2.0m,环向每断面4个,保证保护层厚度偏差小于 $\pm 10\text{mm}$ 。

3.2 施工过程定位精度控制

测量放样采用“三级复核”系统,保证桩位精度:一级复核采用GNSS静态测量(平面精度 $\pm 5\text{mm}$)布设控制网,二级复核采用全站仪按极坐标法布设桩位(偏差不得超过20mm),三级复核采用护桩形成十字控制网(护桩间距误差 $\leq 5\text{mm}$),实时校准桩孔中心位置。下放钢筋笼前,用电子水准仪(高程精度 $\pm 0.5\text{mm}$)对孔口标高进行测量,并与设计桩顶标高进行精确计算(偏差 $\leq 5\text{mm}$),吊筋采用HRB400级(直径 $\geq 20\text{mm}$),双吊筋对称布置(夹角 180°),避免因单点力导致骨架倾斜。

根据钢筋笼的重量和长度,采用特殊的吊装方案,即重量 ≤ 5 吨,长度 $\leq 20\text{m}$ 的钢筋笼,采用双吊点(间距1/3)吊装,对于重量大于5t,长度大于20m的钢筋笼,采用“三点吊装”方式(两端吊点距端部1/4,中间起吊位置在中间),并配有截面高度 $\geq 800\text{mm}$ 的钢扁担梁(截面高度 $\geq 800\text{mm}$),以避免吊装过程中的吊装变形。选择50t以上的小车吊机(起升高度误差不超过50mm),起吊速度控制在0.3-0.5m/秒,采用“双全站仪”实时监控垂直度,一台监控纵向垂直度,一台监控横向垂直度,当桩位偏差大于0.5%时,立即停止下放,采用调整吊点位置或增加侧向牵引装置来纠正偏差。

钢筋笼下放到位后,采取“双重固定”措施,一是采用2

根I20工字钢构成的“十字定位架”,采用膨胀螺栓将壁厚 $\geq 8\text{mm}$ 的钢护筒牢固连接在钢护筒上,并用钢楔将定位架和钢筋笼之间的间隙进行楔块楔入,以限制水平位移;二是在孔底安装“导向定位鞋”,该鞋由钢板制成(厚度 $\geq 10\text{mm}$),内径与钢筋笼直径相同(偏差 $\pm 2\text{mm}$),鞋底设有3只支撑爪(与孔底接触面积 $\geq 100\text{cm}^2$),以防止钢筋笼下沉或移位。同时,采用 $\Phi 20\text{mm}$ 钢筋制作限位杆,一端焊于钢筋笼内,另一端与孔壁(预留 20mm 缓冲间隙),以进一步限制其水平位移。

3.3 混凝土灌注与过程监测控制

优化混凝土灌注过程以减小局部扰动;采用“分级灌注”的方法,第一次灌浆速度控制在 $1\sim 2\text{m/h}$,保证导管埋入 $1.5\sim 2.0\text{m}$ 的深度;正常灌注时,应以 $2\sim 4\text{m/h}$ 为宜,以防止侧压过大;在接近钢筋笼顶部(距顶部 $1\sim 2\text{m}$)时,将车速降低到 $1\sim 1.5\text{m/h}$,以减小混凝土对钢筋笼的上顶压力^[5]。导管采用 $\Phi 300\text{mm}$ 螺旋波纹管(壁厚 $\geq 5\text{mm}$),下放时保证中心位置(距钢筋笼间距 $\geq 100\text{mm}$),防止碰撞;导管埋设深度为 $2\sim 6\text{m}$,每次灌注 $3\sim 5\text{m}^2$ 混凝土,测量混凝土液面高度,精确计算出导管提升高度(偏差不得超过 50mm),避免导管提升过程中与钢筋笼发生碰撞。

采用智能监控技术对其进行动态监控,在钢筋笼上部和中部安装“倾角-位移一体化传感器”(测量精度:倾角 $\pm 0.01^\circ$,位移 $\pm 0.1\text{mm}$),利用5G无线技术将数据传输到监测平台上,实时绘制定位参数的变化曲线,当偏差大于允许值时(平面偏差大于 30mm ,竖向偏差大于 0.8%),由现场操作人员调整吊筋张力或侧向牵引装置进行修正^[6]。同时,利用超声检测器

(0.1mm 分辨率)实时扫描孔中钢筋笼的位置,形成钢筋笼截面位置分布图,直观地反映其位置偏差。在施工过程中,安排专职质检人员在旁监督,记录施工过程中的位置参数、灌注速率和埋设深度,形成“定位-灌注”全过程的质量可追溯文件(精细化施工控制精度达标如表2)。

表2 精细化施工控制精度达标表

控制环节	关键控制指标	目标精度	达标率要求
测量放样	桩位偏差	$\leq 20\text{mm}$	100%
吊装下放	垂直度偏差	$\leq 0.5\%$ 桩长	100%
定位固定	保护层厚度偏差	$\pm 10\text{mm}$	100%
混凝土灌注	导管埋深	$2\sim 6\text{m}$	100%

4 结语

综上所述,钢筋笼定位精度对桩身完整性的影响贯穿于“筋-混凝土-地层”协同服役全过程,其控制水平直接决定了桥梁在强地震、冲刷和疲劳荷载作用下的安全储备。未来,可结合毫米级感知、数字孪生、自适应配中等技术,实现“设计-施工-运营”数据闭环,为实现深水大跨度桥梁实现百年无维修的目标奠定基础,推动桩基础工程由“事后检测”向“事前塑造”的跨越。

参考文献:

- [1] 白宏光.桥梁桩基钢筋笼定位工艺解析[J].中华建设,2022,(08):147-148.
- [2] 张丽华.桥梁桩基钢筋笼定位施工技术分析[J].运输经理世界,2022,(01):86-88.
- [3] 王培.公路桥梁桩基钢筋笼定位施工技术[J].交通世界,2021,(28):115-116.
- [4] 王东.桥梁桩基钢筋笼定位施工技术[J].中国科技投资,2021,(09):172-173.
- [5] 刘铁柱,唐森磊,邹磊.桥梁桩基钢筋笼准确定位的方法探讨[J].中华建设,2020,(08):140-141.
- [6] 杨志雄.贺巴高速公路桥梁桩基钢筋笼定位施工技术分析[J].西部交通科技,2020,(05):109-111.