

跨通航河道特大桥大直径钻孔灌注桩自平衡试桩检测技术研究

王 召

河北道桥工程检测有限公司 河北石家庄

【摘要】针对跨通航河道特大桥地质条件复杂，试桩涵盖陆上引桥、水中引桥及水中主桥桩基的工程特点，采用超声波成孔质量检测、声波透射法桩身完整性检测与自平衡法桩基静载试验相结合的成套检测技术，完成 3 根大直径钻孔灌注桩试桩检测。介绍试桩方案设计、荷载箱与钢筋应力计埋设工艺、现场测试流程，阐述自平衡试验加载控制、桩身轴力、分层侧摩阻力以及极限承载力的计算思路。结果表明，该组合检测方案可同步评价成孔质量、桩身完整性与桩基承载性能，获取各土层实测侧摩阻力参数；潮间带复杂工况条件下，荷载箱安装精度、测试线缆防护、成桩灌注工艺是保障自平衡试桩成功实施的关键，可为同类地区大直径钻孔灌注桩试桩工程提供借鉴。

【关键词】通航河道；钻孔灌注桩；自平衡法；成孔质量；声波透射；侧摩阻力；跨河桥梁

【收稿日期】2026 年 6 月 12 日

【出刊日期】2026 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260054

Research on self-balancing test pile detection technology for large-diameter drilled piles of extra-large bridges crossing navigable waterways

Zhao Wang

Hebei Road and Bridge Engineering Testing Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】 Considering the complex geological conditions of extra-large bridges crossing navigable waterways and the engineering characteristics of the test piles covering the land approach bridge, water approach bridge, and water main bridge pile foundations, a complete set of detection technology combining ultrasonic hole quality detection, acoustic transmission method for pile integrity detection, and self-balancing pile static load test was adopted to complete the detection of 3 large-diameter drilled pile test piles. The test pile scheme design, load box and vibrating-wire steel bar stress gauge embedding technology, and on-site testing process were introduced. The loading control of self-balancing test, pile axial force, layered side friction resistance, and ultimate bearing capacity calculation ideas were expounded. The results show that this combined detection scheme can simultaneously evaluate hole quality, pile integrity, and pile foundation bearing performance, and obtain the measured side friction resistance parameters of each soil layer. Under complex conditions of intertidal zone, the installation accuracy of the load box, the protection of test cables, and the construction and pouring process of the pile are the key to ensuring the successful implementation of the self-balancing test pile. This can provide a reference for similar large-diameter drilled pile test pile projects in other regions.

【Keywords】 Navigable waterways; Drilled piles; Self-balancing method; Hole quality; Acoustic transmission; Side friction resistance; River-crossing bridge

引言

滨海河口区域广泛分布冲填土、粉土、粉质黏土、粉砂等海陆交互沉积地层，土层物理力学性质空间差异性显著，场地受潮汐往复冲刷、浸泡作用，桩基受力机理复杂多变。大直径钻孔灌注桩是跨通航河道特大桥的核心基础形式，传统堆载-锚桩静载试验需搭设大型

反力装置，在水上、潮间带受限场地实施难度极大，设备投入成本高、施工周期长、安全风险突出。自平衡静载试验通过在桩身平衡点埋设荷载箱，依托桩身上段侧摩阻力与下段侧摩阻力、端摩阻力的相互平衡实现分级加载，无需地面大型反力设施，完美适配水上、滩涂等作业空间受限、施工条件复杂的桩基检测场景^[6]。

作者简介：王召（1986-）男，汉族，河北保定人，本科，工程师。

某跨通航河道特大桥河床宽度大,水位受潮位周期性影响显著,为精准获取桩基设计岩土参数、验证现场成桩工艺可靠性,本次研究选取1根陆上非工程试桩、2根水上工程试桩开展成套检测试验,同步实施成孔质量检测、桩身完整性检测、自平衡承载力测试及桩身钢筋应力监测。本文依托该实体工程,系统探究潮间带复杂环境下大直径钻孔灌注桩成套试桩检测关键技术 with 工艺控制要点。

1 工程与试桩概况

1.1 桥梁工程概况

某特大桥桥梁全长1290m,全桥共计11联。主桥采用50m+2×85m+50m预应力混凝土变截面连续箱梁结构,引桥采用30m预制T梁结构;桥梁下部结构统

一采用钻孔灌注桩群桩基础,桥面总宽度29m。跨越河道兼具通航、防洪排涝双重功能,设计明确规定了通航水位、高潮控制水位及通航净空控制标准。桥址区地层自上而下主要为冲填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉砂、粉土,各土层侧摩阻力、压缩特性差异显著,对桩基承载性能影响较大^[1]。

1.2 试桩参数

本次试验共设置3根大直径钻孔灌注桩试桩,桩径均为1.8m,包含1根陆上引桥非工程试桩、1根水上引桥工程试桩及1根水上主桥工程试桩。荷载箱埋设位置结合场地地质勘察成果确定,严格遵循上段桩总侧阻力与下段桩侧阻力、桩端阻力基本平衡的设计原则。各试桩核心技术参数如下表所示。

表1 试桩核心技术参数表

桩号	桩顶标高/m	桩底标高/m	桩径/m	桩长/m	荷载箱距桩端/m	设计预估容许承载力/kN
S-1	4.663	-60.337	1.8	65	20	5800
S-2	5.800	-70.200	1.8	76	20	6400
S-3	0.299	-89.701	1.8	90	23	5546

本次试桩检测包含三项核心内容:①超声波成孔质量检测,精准检测孔径、钻孔垂直度、孔底沉渣厚度等关键成孔指标;②声波透射法桩身完整性检测,判别桩身混凝土成型质量及缺陷情况;③自平衡法单桩竖向承载力测试,同步布设弦式钢筋应力计,监测桩身轴力分布规律,计算各土层分层侧摩阻力^[4]。

2 检测原理与方法

2.1 超声波成孔质量检测

超声波成孔质量检测仪探头在泥浆介质中发射超声波,声波接触孔壁后发生反射,设备接收换能器采集反射声波的传播时长与波形参数,通过数据换算得到钻孔实际孔径;通过采集正交两个方向的孔壁轮廓变化数据,定量评价钻孔垂直度偏差;结合钻机钻进深度与设备实测孔深的差值,精准计算孔底沉渣厚度^[5]。

检测作业需在钻孔清孔完成、泥浆内部气泡完全消散后开展,探头匀速升降,完成钻孔正交双向全覆盖扫描。针对孔径异常的可疑区段,采取加密测点复测方式,精准判定缩径、扩径的具体位置与影响范围,全面评价钻孔成型质量。

2.2 声波透射法桩身完整性检测

试桩施工阶段在桩身内部预埋4根对称布置的声测管,检测前向管内灌满清水实现声波耦合,检测仪器换能器在不同声测管之间同步匀速升降,实时采集各测点的声时、波幅、频率及波形特征参数。通过声时数

据计算桩身混凝土声速,结合波幅判据,搭配加密平测、双向斜测、扇形扫测等精细化检测手段,综合判定桩身缺陷的位置、形态、分布范围,依据规范划分桩身完整性类别^[4]。

检测作业要求被检桩混凝土强度不低于设计强度的70%,且最小强度不小于15MPa;检测全过程保持仪器发射电压、采样频率等核心参数固定,杜绝系统误差。对波形异常、声速偏差较大的区段,加密测点复核确认缺陷情况。桩身完整性合格是开展桩基承载力试验的前置条件,若桩身存在严重蜂窝、空洞、断桩等缺陷,承载力测试数据无工程参考价值。

2.3 自平衡法承载力与桩身内力测试

2.3.1 试验原理

试验将特制环形荷载箱精准埋设于桩身力学平衡点位置,通过高压油泵向荷载箱内部加压,荷载箱同步对上段桩、下段桩施加双向荷载。加载过程中,上段桩依托向上的桩侧摩阻力、下段桩依托向下的桩侧摩阻力与桩端阻力形成受力平衡,实现无反力架静态加载^[2]。通过位移杆实时采集荷载箱位置向上、向下的位移数据;在桩身不同高程布设多层弦式钢筋应力计,采集各级荷载作用下的钢筋应变数据,换算得到桩身各截面轴力,进而计算不同土层的分层侧摩阻力,最终依据行业规范转换得到等效传统静载试验条件下的单桩竖向极限承载力。

2.3.2 桩身轴力、侧摩阻力计算思路

通过钢筋应力计采集的频率读数, 标定计算钢筋实际受力大小。同级荷载作用下, 基于变形协调原理, 桩身混凝土应变与钢筋应变保持一致, 据此推导计算桩身截面整体轴力。通过上下相邻两个量测截面的轴力差值, 结合对应桩段侧表面积, 精准计算该桩段对应土层的实测侧摩阻力, 同步分析侧摩阻力随桩身位移的动态变化规律^[6]。

2.3.3 加载制度

试验采用慢速维持荷载法, 单级加载量取预估极限加载值的 1/15, 第一级加载值取两倍分级荷载。每级加、卸载完成后, 严格按照规范时间节点读取位移数据, 待位移达到稳定标准后方可施加下一级荷载。其中, 细粒土层以最后 1h 桩身位移变化不大于 0.1mm 作为稳定判定标准, 粗粒土、坚硬黏质土层以最后 30min 位移变化不大于 0.1mm 作为稳定标准。当出现桩身位移突变、总位移达到 40mm 等极限状态时, 立即终止加载。卸载采用分级卸荷方式, 卸载至零荷载后, 持续观测桩身残余位移不少于 2h^[2]。

3 现场关键施工与安装工艺

3.1 荷载箱安装控制

荷载箱埋设精度与安装质量是决定自平衡试桩试验成败的核心因素, 结合潮间带水上施工特点, 现场重点把控以下工艺要点:

1) 整体成型加工: 在胎架平台上将荷载箱与钢筋笼一体化加工制作, 严格控制荷载箱与钢筋笼主轴垂直度误差 $\leq 0.3\%$, 采用铅垂、激光垂准仪双重校核, 杜绝偏心受力影响试验精度。

2) 主筋加固处理: 荷载箱上下区域主筋不得直接贯通, 在荷载箱位置断开, 通过 L 型加强筋、喇叭筋焊接加固; 喇叭筋导正角度控制在 60° 以上, 便于混凝土浇筑导管顺利穿过荷载箱, 避免卡管、堵管问题。

3) 箍筋加密强化: 对荷载箱上下 3m 范围内钢筋笼进行箍筋加密处理, 箍筋间距统一设置为 10cm, 提升该区域桩身混凝土约束能力, 防止加载过程中桩身局部开裂。

4) 管线密封防护: 声测管穿过荷载箱预留孔位并焊接密封, 保证止水防渗性能; 高压油管全程引至地面, 敷设过程中严禁弯折、扭转, 避免油路堵塞、泄压。

5) 混凝土浇筑管控: 水下混凝土浇筑时, 导管穿透荷载箱直达孔底; 当混凝土面升至荷载箱附近时, 放缓导管拔升速度, 平稳浇筑。荷载箱下部混凝土坍落度控制 $\geq 200\text{mm}$, 保障混凝土流动性与密实度; 待荷载

箱上部混凝土浇筑高度超 2.5m 后, 方可将导管底端拔出荷载箱区域, 杜绝荷载箱周边出现空洞、夹渣缺陷^[3]。

3.2 弦式钢筋应力计埋设

桩身每个测试截面沿桩周对称布设 4 支弦式钢筋应力计, 测试截面优先布置在地层分界面、受力关键层位, 且距离桩顶、桩底、荷载箱的距离不小于 1 倍桩径, 保证监测数据精准反映土层受力特性。钢筋应力计与桩身主筋采用双面绑条焊接, 绑条搭接长度不小于 6 倍钢筋直径, 保障焊接牢固性。

焊接作业期间, 采用湿棉纱包裹传感器主体并持续淋水降温, 严格控制传感器工作温度 $\leq 60^\circ\text{C}$, 禁止直接向高温传感器泼水, 防止传感器炸裂失效。所有测试线缆每隔 2m 绑扎固定于钢筋笼内侧, 规避混凝土浇筑冲击、钢筋笼吊装拖拽造成的线缆破损、移位^[9]。

3.3 测试休止期要求

成桩完成后, 需同时满足混凝土强度与土体休止时间双重条件方可开展试验。混凝土强度需达到设计强度的 70% 以上; 土体休止时间严格遵循规范要求, 其中砂土休止时间不少于 7d, 粉土不少于 10d, 饱和黏土不少于 25d^[4]。结合本项目地层特性与施工进度, 成桩 14d 后开展声波透射桩身完整性检测, 成桩 28d 后开展自平衡静载承载力试验, 保障土体固结稳定、混凝土强度达标, 确保试验数据真实可靠。

4 检测结果与分析

通过成套组合检测技术, 系统获取试桩成孔质量、桩身完整性、承载性能及桩身内力分布等多维度数据, 具体成果与工程启示如下:

1) 成孔质量检测结果: 精准测得 3 根试桩的实际孔径、钻孔倾斜率、孔底沉渣厚度等参数。试验表明, 潮间带潮汐往复扰动会导致钻孔易出现局部扩径、缩径、沉渣厚度超标等问题, 施工中需针对性优化泥浆比重、黏度等指标, 强化二次清孔工序, 提升成孔质量稳定性^[7]。

2) 桩身完整性检测结果: 通过声波透射法完成所有试桩完整性判别, 所有试桩桩身混凝土密实均匀, 无空洞、夹渣、断桩等缺陷, 完整性均满足规范合格要求, 为后续承载力试验提供了基础保障^[4]。

3) 桩基承载力测试结果: 通过自平衡试验获取荷载箱上、下双向荷载-位移曲线, 依据规范转换得到等效桩顶荷载-位移关系, 精准判定单桩竖向极限承载力, 验证了桩基设计参数的合理性与现场成桩工艺的可靠性^[2]。

4) 桩身内力与侧摩阻力结果: 基于钢筋应力计监

测数据,得到各级荷载下桩身轴力沿深度的分布规律,计算得出各土层实测分层侧摩阻力。将实测参数与地勘报告建议参数对比,发现滨海河口相地层土层摩阻力离散性较强,实测数据可有效修正设计参数,提升桩基设计精准度^[7]。

工程实践启示:水上试桩工况相较于陆上试桩更为复杂,潮水涨落、波浪振动易扰动测试管线与基准系统。施工中需将基准梁、基准桩与施工平台可靠锚固连接,降低振动引发的位移测量误差;对外露油管、电缆等测试构件设置专用防护围栏,避免施工碰撞、水流冲刷造成设备损坏,保障测试全过程稳定可控^[8]。

5 结论

1) 针对跨通航河道特大桥潮间带复杂工况,采用“超声波成孔检测-声波透射完整性检测-自平衡静载试验+钢筋应力监测”成套组合检测技术,可通过单根试桩同步完成成孔施工质量、桩身完整性、桩基竖向承载能力评价,同时获取各土层实测分层侧摩阻力。相较于传统静载试验,该技术无需大型反力装置,适配性强、效率高、成本低,尤其适用于水上、滩涂等受限场地桩基检测^[6-7]。

2) 自平衡试桩试验成败高度依赖现场精细化埋设与施工工艺。荷载箱安装垂直度、加强筋与喇叭筋焊接质量、混凝土坍落度控制、导管提升时序、传感器及线缆防护是现场施工的核心控制点,直接决定荷载箱成型质量与试验数据精度^[9]。

3) 滨海河口海陆交互相沉积地层土层力学参数离散性显著,依托多层钢筋应力计监测可精准获取各土层实际发挥的侧摩阻力,有效修正勘察设计建议参数,可为同区域同类跨河桥梁大直径桩基设计提供实测数据支撑,优化桩基设计安全性与经济性^[1,7]。

4) 水上试桩易受海潮、波浪、施工振动干扰,试验过程中需强化位移基准系统、外露测试管线的防护管控;严格执行混凝土强度与土体休止期双重控制标准,可有效规避环境与施工因素干扰,保障试桩检测数据的真实性、准确性与有效性^[2,4]。

参考文献

- [1] JTG 3363 2019,公路桥涵地基与基础设计规范 [S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [2] JT/T 738 2009,基桩静载试验 自平衡法 [S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [3] JTG/T 3650 2020,公路桥涵施工技术规范 [S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [4] JTG/T 3512 2020,公路工程基桩检测技术规程 [S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [5] T/CECS 596 2019,灌注桩成孔质量检测技术规程 [S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [6] 戴国亮,龚维明,自平衡试桩法理论与实践 [M]. 北京:科学出版社,2018.
- [7] 黄挺,滨海地区大直径钻孔灌注桩试桩关键技术 [J]. 公路交通科技,2022,39 (S1):234-239.
- [8] 胡利文,娄学谦,周密,等. 海上风电钢管桩自平衡法现场试验研究 [J]. 海洋工程,2023,41 (01):141-151.
- [9] 谭祖彪,超长直径灌注桩自平衡试验安装技术研究[J]. 低温建筑技术,2020,42 (06):140-143.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS