

公路桥梁预应力混凝土管桩应用关键技术研究

刘建武

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 313000

DOI:10.61369/SDR.2025030009

摘 要 : 基于软土地质条件, 通过现场试验、理论分析、数值模拟计算、模型试验及工程实例验证等综合性手段, 研究预应力混凝土管桩在浙江省高速公路桥梁中应用的关键技术问题, 建立有效的设计和施工方法, 提出预应力混凝土管桩合理施工工艺与质量控制标准。

关 键 词 : 荷载试验; 承载特性理论分析; 管桩桩身及承台连接; 施工物联网管控系统

Research on Key Technologies of Prestressed Concrete Pipe Pile Application in Highway Bridges

Liu Jianwu

Zhejiang Jiaogong Hongtu Traffic Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 313000

Abstract : Based on soft soil geological conditions, through comprehensive means such as field tests, theoretical analysis, numerical simulation calculations, model tests, and engineering example verification, the key technical issues of prestressed concrete pipe pile application in highway bridges in Zhejiang Province are studied. Effective design and construction methods are established, and reasonable construction technology and quality control standards for prestressed concrete pipe piles are proposed.

Keywords : load test; theoretical analysis of bearing characteristics; connection of pipe pile body and pile cap; construction IoT management and control system

一、依托工程概述

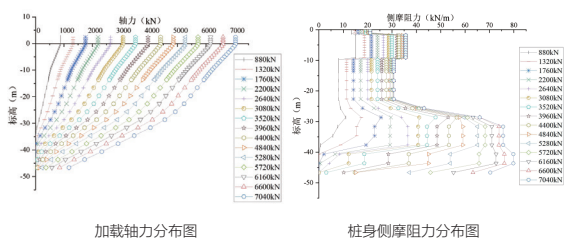
苏台高速公路(一期)的嵇家浜特大桥, 位于湖州市南浔区, 桥位处属于平原水网地区, 地形平坦开阔, 地质以粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土为主。桥梁基础采用8根大直径高强预应力混凝土管桩(桩长49m), 型号为PHC800(130)-AB, 呈哑铃型分布, 承台采用王字型承台。^[1]

二、PHC管桩基础荷载试验与设计分析计算

(一) PHC管桩基础荷载试验

PHC管桩基础荷载试验采用慢速维持荷载法, 对单桩、群桩基础的竖向、水平静载试验。采用RS-JYD静载荷测试分析仪、电子位移传感器、光纤光栅应变传感器、光纤光栅解调仪等检测 and 采集桩顶荷载-位移响应数据。

经检测, 单桩的轴力随深度不断减小, 这是由于荷载由上至下传递。在桩顶附近, 上部荷载仅由桩体压缩来承担, 随着深度增加, 桩-土侧摩阻力逐渐发挥作用, 并且累积侧摩阻力不断增加, 直到桩端的桩端阻力参与承担上部荷载。桩身内力测试的结果表明, 各桩的桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担, 均表现出摩擦桩的承载性状。^[2]



水平静载试验荷载-位移单桩和群桩基础的H-Y曲线均表现出缓变型的非线性变化趋势, 无明显的塑性突变点。可取水平力-力作用点位移梯度曲线的第二拐点作为单桩、群桩基础的水平极限承载力。^[3]

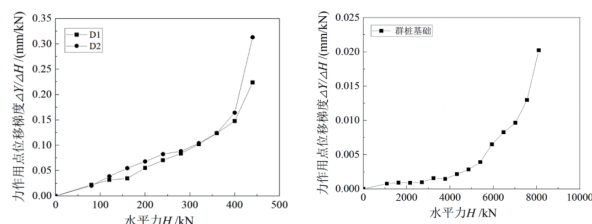


图4 单桩水平力H-力作用点位移梯度 $\Delta Y/\Delta H$ 曲线 图6 群桩整体水平力H-力作用点位移梯度 $\Delta Y/\Delta H$ 曲线

单桩和群桩基础的桩身水平位移测试表明, 在同一水平荷载作用下, 水平受荷管桩的桩身水平位移随深度的增加而非线性减小, 加载点处水平位移最大。群桩中各基桩在桩顶加载点附近出现最大负弯矩, 随后沿桩身产生非线性减小后反向增加, 在某一处达到一正弯矩极大值, 最后弯矩方向振荡往复, 并于-16m附近消失。

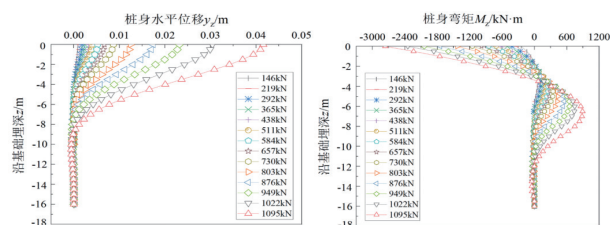


图8 群桩Q3桩身水平位移曲线

图10 群桩Q3桩身弯矩分布

群桩桩身水平位移曲线图

群桩桩身弯矩分布图

（二）管桩内力和承载特性理论分析

在对桩竖向承载特性展开研究时，采用荷载传递法进行迭代计算，基于 AP 模型和双曲线模型，展开理论计算分析。

研究表明，对于单桩基础的竖向承载特性来说，API 模型函数骨干特性优势显著，在 Q-s 曲线的陡降区附近适用性更好，而双曲线模型对初始刚度的预测更佳，在小荷载条件下的预测结果优于 API 模型。此外，同一场地不同桩长的单桩适用不同的侧阻折减系数，需对短桩予以更多的侧阻折减。

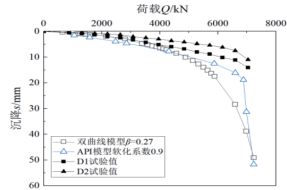


图 10 单桩 D1、D2 Q-s 曲线计算值与试验值对比

单桩 Q-s 曲线计算值与试验值对比

对于单桩基础的水平承载特性来说，采用 API 方法计算单桩水平承载特性的结果过于保守，对本试验的适用性不强。基于单桩水平试验结果，对 Reese 极限土抗力计算公式进行修正，以双曲正切函数模型为骨干，建立了可以通过土工参数预测的 p-y 曲线公式。该计算方法对单桩桩顶荷载-位移曲线、桩身水平位移、桩身弯矩分布的预测结果较好，计算方便快捷，适用于工程应用。^[4]

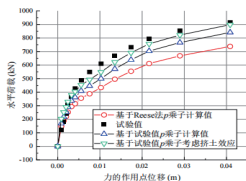


图 4-57 Q2、Q6 H-Y 曲线计算结果

单桩 H-Y 曲线计算结果

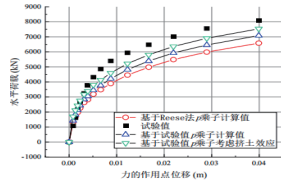


图 4-60 群桩整体 H-Y 曲线计算结果

群桩整体 H-Y 曲线计算结果

三、管桩桩身连接、管桩（群桩）与承台的连接技术改进

（一）管桩桩身连接

管桩接头主要有焊接连接、抱箍连接、法兰连接等形式，为了满足高速公路桥梁工程的需要，提高桩身接头的可靠性、便利性、耐久性，采用焊接 + 机械抱箍式连接的接桩方案。抱箍由三个弧度约 120° 的相同部件组成，其上设有一定数量直径相同的螺栓孔，螺栓孔在每片机械连接卡上均匀分布。为进一步加强耐久性，在接头连接完成后，涂刷 500um 厚度的防腐耐蚀磨涂层，确保桩基安全耐久。按照每年以 0.2mm 的腐蚀计算，以 100 年为设计年限，要求在 100 年后其力学性能仍能满足要求。

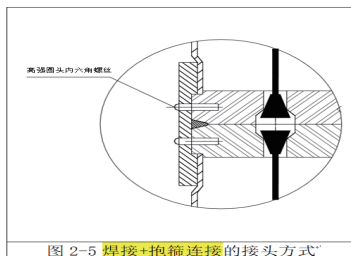


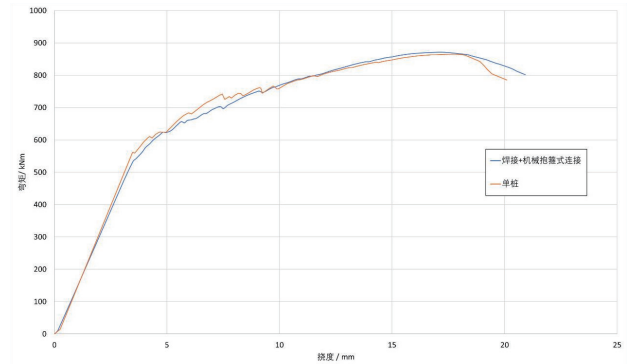
图 2-5 焊接+抱箍连接的接头方式



图 2-6 抱箍式连接的现场图

焊接 + 机械抱箍式连接图

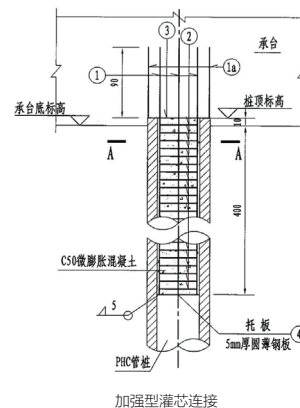
管桩经焊接 + 机械抱箍式连接后进行抗弯承载力试验，及采用大型通用有限元计算软件 Abaqus/CAE 2017 对实体试验进行模拟分析表明，加载初期，桩身处于弹性工作状态，荷载 - 挠度曲线图中表现为一条直线。随后桩身出现裂缝，进入带裂缝工作状态，荷载 - 挠度曲线图中表现为一条斜率不断减小的曲线。最后桩身受压区混凝土压碎，承载力达到极限值。通过对两模型的荷载 - 挠度曲线可以看出，采用焊接 + 机械抱箍式连接的管桩接桩处在承载能力、变形特点等方面与管桩桩身是一致的，说明该种接桩方式满足“桩身等强”的要求。



两模型的荷载 - 挠度曲线

（二）管桩（群桩）与承台的连接

由于桥梁桩基的单桩荷载较大，为了改进和加强桩顶与承台连接，项目参照《预应力混凝土管桩》10G409 标准图集方案基础上进行设计优化，采用加强型灌芯连接。即在管桩内腔设置一圈竖向钢筋，该钢筋的底部深入管桩内部 4 米，该钢筋的顶部深入承台内 1 米，单根钢筋总长 5 米，这一圈钢筋外面由环形箍筋套箍起来。在管桩的钢制端板上焊接多根 L 型钢筋，承环环排列。由此在管桩顶部形成内外两层环形布置的钢筋，外圈钢筋与管桩端板稳固连接，内圈钢筋深入管桩内部且通过灌芯砼与管桩稳固连接。该方案在施工便利性方面较好，无需对管桩生产线进行改造，可以直接采用市场购买的标准成品管桩，适用性更强。

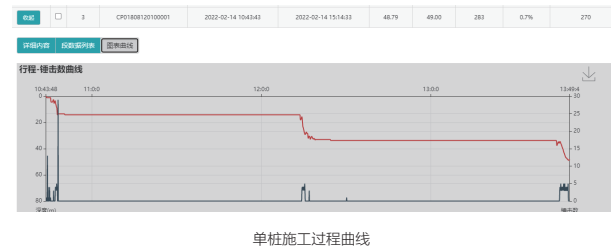


加强型灌芯连接

四、锤击法管桩施工物联网管控系统

施工物联网管控系统由数字化交付接收子系统、施工信息采集子系统、施工问题上报子系统、信息库管理等组成。对管桩桩机、施工过程、施工人员进行数字化建模，可以对施工过程进

行分析,同时也作为各项施工数据指标的可视化基础,记录管桩的设计信息、施工进度和其他施工中采集的数据,形成的数据信息档案交付给业主。通过段数据列表和图表曲线的形式展示系统采集施工桩信息,包括桩号、桩长、锤击次数、最大斜度、定位、开始结束时间等施工过程信息。图表展示锤击数、深度随时间的变化情况,更直观清晰展示施工过程送桩深度变化与锤击次数之间的关系。直观展现施工进度情况,对施工质量进行合理的评估。^[5]



五、施工要点及注意事项

施工前,认真做好试桩工作,通过试桩确定锤击法沉桩的标准,以及单桩承载力特征值。施工中,第一节管桩起吊就位插入地面的垂直度偏差不得大于0.5%,用测量仪器从正面、侧面按90°方向架设经纬仪监测下桩垂直度,必要时宜拔出重插,严禁移动桩机纠偏。若桩间距小于三倍桩径时必须跳打。每根桩应一次性连续施工,尽量减少停歇时间。PHC管桩基础以控制桩端设

计标高为主,贯入度控制为辅(三次十锤的平均贯入度,不大于规定的数值)。

工程中尽量减少接桩,接桩宜在桩尖穿过硬土层后进行,应避免桩尖接近硬持力层或桩尖处于硬持力层中接桩。任一单桩的接头数量不宜超过3个。接桩时,下节桩的桩头处宜设置导向箍,以便于上节桩就位。接桩时上下节桩段应保持顺直,错位偏差不宜大于2mm。焊接采用二氧化碳气体保护焊,焊接时先在坡口圆周上对称点焊4点~6点,再分层对称施焊焊接层数为3层,焊接质量应符合《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205-2020)的有关规定。焊接接头在自然冷却后方可继续沉桩,冷却时间不宜少于8min。

桩的静荷载试验根数不少于总桩数的1%,且不少于3根;只有50根时,不少于2根。桩身质量检验时高、低应变,不少于桩总数的15%,且每个承台不少于1根。承载力检测数量不宜少于总桩数的5%,且不得少于5根。

六、结论

通过苏台高速公路(一期)的嵇家浜特大桥实践表明,PHC管桩作为桥梁基础具有单桩承载能高、设计灵活、施工便捷可靠、施工场地文明、单位承载力经济性好的优势,更符合节能减排、低碳环保的要求;各项技术指标满足设计和规范要求。在浙江省及类似地质区域的桥梁建设中,具有极大的推广潜力,有望广泛应用。

参考文献

- [1] 姚景耀. 高强预应力混凝土(PHC)管桩在软弱地基的桥梁基础中的应用[J]. 四川建材, 2008, 03: 140-141.
- [2] 郭昭胜. 强震下PHC管桩与承台连接节点的抗震性能及设计方法研究[D]. 太原理工大学, 2017.
- [3] 李波, 余建飞. 基于PHC管桩现场静载试验的基桩承载特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10): 96-102.
- [4] 苏凯悦. 桥梁群桩基础水平及竖向承载性能原位试验[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [5] 田一鸣, 谢黎明, 赵翔, 杜赛赛. 锤击法管桩施工管理系统研究与实现[J]. 中国管理信息化, 2020(1): 90-91.