

沿海地区周边环境复杂有限空间钢栈桥钢管桩振动锤选型

王明波

中铁广州工程局集团第三工程有限公司 广东 526000

【摘要】：沿海地区钢栈桥施工常面临水深大、水流急、潮差显著及水下地质复杂等难题，若叠加周边既有构筑物、管线等限制，有限空间下的施工安全与技术难度将大幅提升。本文以南沙区亭角大桥拓宽改造工程为研究载体，该项目施工区域临近四类危桥（旧亭角大桥）及重要供水管道，大型设备作业受限，且需严格控制钢管桩施工对旧桥桩基的扰动。基于工程地质条件与周边环境特征，系统分析了振动沉桩对既有桥梁桩基的轴力、弯矩及位移影响，建立了涵盖激振力、端动阻力、振幅、偏心距及频率的振动锤多参数选型体系，结合现场试验验证了选型方案的合理性。实践表明，所选振动锤实现了钢管桩安全高效沉桩，旧桥结构响应均控制在允许范围内，施工效率较计划提升12%。本研究提出的选型方法与技术措施，为沿海复杂环境及有限空间下钢栈桥钢管桩施工提供了可靠技术参考，具有较高的工程应用价值。

【关键词】：沿海地区；有限空间；钢栈桥；钢管桩；振动锤选型；危桥保护

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.010

1 引言

目前，钢管桩沉桩主要分为冲击沉桩与振动沉桩两类工艺。冲击沉桩因施工振动大、挤土效应显著，易对周边构筑物造成较大扰动，且施工效率偏低、成本较高，在复杂周边环境下的适用性受限。液压振动沉桩通过偏心轮旋转产生周期性激振力，使桩体产生垂直振动，促使周边土体液化，利用桩体与锤体自重实现沉桩，具有设备组合简单、操作便捷、地层扰动小、施工效率高及环保性好等优势，已广泛应用于各类钢栈桥施工中。本文基于该工程实例，深入探讨振动锤选型的关键技术要点，通过理论计算与数值模拟结合现场试验的方法，形成一套完整的选型方案，为类似工程提供技术借鉴。

2 工程背景与施工难点

2.1 工程概况

亭角大桥位于广州市南沙区明珠湾区与蕉门河中心区西北侧，是省道S358上跨蕉门水道的重要交通枢纽，本次拓宽改造工程涉及新建右半幅桥梁，全长816m，桥面宽15m，跨径组合为11×16m+6×30m+2×50m+6×30m+11×16m，采用双孔单向通航设计。新建主栈桥及作业平台主要服务于水中7#~19#墩施工，栈桥采用Φ630×10mm及Φ820×10mm钢管桩基础，顶面标高分别为9.4m和8.9m。项目区域水文条件复杂，距上游蕉门水道、高沙河、骊岗水道交汇口仅950m，水深大、水流急，涨落潮差显著；水下地质自上而下依次为淤泥、淤泥质土、中砂及强风化花岗岩，土层分布不均，力学性质差异大。同时，旧亭角大桥为四类危桥，主跨桩基采用C80-PHC-B600预应力管桩摩擦桩，栈桥钢管桩与旧桥19#墩最小中心距仅2.5m，净距1.775m；下游侧11m处存在埋深于河床下的DN1400供水管道，进一步压缩了施工空间。

2.2 核心施工难点

(1) 空间限制严格：受旧桥与供水管道双重约束，施工

区域狭窄，大型吊装设备作业半径受限，需采用小型化、高精度施工设备与工艺。(2) 旧桥安全风险高：旧桥为四类危桥，桩基承载力储备有限，钢管桩沉桩产生的振动与挤土效应可能导致旧桥桩基承载力下降、变形超限，甚至引发结构失稳。(3) 水文地质复杂：沿海涨落潮导致桩身受动力态变化，淤泥层与砂层交互分布增加了沉桩阻力的不确定性，易出现桩身倾斜、沉桩困难等问题。(4) 环保与质量要求高：施工需避免对蕉门水道水体造成污染，同时钢管桩需沉入强风化岩层，确保栈桥承载能力满足施工要求。

2.3 工程地质条件

根据现场勘察资料，项目区域土层分布及主要力学参数如下表所示。

表1 项目区域土层分布及主要力学参数

土层编号	土层名称	平均厚度(m)	桩侧极限摩阻力 τ_i (kPa)	桩端极限承载力 σ (kPa)	标准贯入击数N(击)
1	淤泥	9.85	4	-	1.5~3.3
2	淤泥质土	16.65	8	-	3.5~5.2
3	中砂	2.9	30	350	19.5~25.9
4	强风化花岗岩	7.3	120	5000	71.7~150

3 钢管桩施工对旧桥的影响分析

3.1 影响机理

钢管桩振动沉桩过程中，对邻近旧桥桩基的影响主要源于两大效应：一是振动效应，振动锤产生的周期性荷载通过土体传递至旧桥桩基，引发桩体振动，可能导致桩周土颗粒重组，

降低桩侧摩阻力；二是挤土效应，钢管桩沉入土体时挤压周边土体，产生超静孔隙水压力，对旧桥桩基产生水平推力，可能导致桩基偏移、弯矩增大。施工流程为：两岸布设定位桩→吊装导向架→钢管桩就位→连接振动锤与桩帽→振动沉桩→铺设桥面系→逐跨推进。为精准评估施工对旧桥的影响，采用 MIDAS GTS NX 有限元软件建立地层-结构模型，模拟不同沉桩深度下旧桥桩基的力学响应。

3.2 数值模拟方案

模拟范围选取长 136m、宽 85m、总厚度 58m 的土体区域，土体采用实体单元，遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则；旧桥桥墩、盖梁采用实体单元，桩基采用梁单元；在桩周与桩端设置接触面单元，模拟桩土相互作用。模型边界条件为：顶面自由，其余各面采用法向约束。模拟工况设定为钢管桩沉入深度 10m、20m、26m 三个阶段，采用 DZ 系列振动锤相关参数作为荷载输入，振动频率 1000r/min (16.67Hz)，激振力 747KN，振动荷载按简谐波形式施加 ($F'=2400 \times \sin((360/0.06) \times T)$)。

3.3 模拟结果分析

3.3.1 桩基轴力影响

旧桥 18#墩与 19#墩桩基在不同沉桩深度下的附加轴力计算结果如下表所示。

表 2 附加轴力计算结果

沉桩深度 (m)	19#墩最大附加轴力 (KN)	18#墩最大附加轴力 (KN)	19#墩轴力增幅 (%)	18#墩轴力增幅 (%)
10	16.48	7.20	1.01	0.59
20	14.85	12.65	0.91	1.03
26	12.61	13.79	0.77	1.12

注：旧桥 19#墩原轴力最大值 1637KN，18#墩原轴力最大值 1227KN。

由表可知，随着沉桩深度增加，旧桥桩基附加轴力呈下降趋势，最大增幅仅 1.12%，远小于规范允许的 5% 限值，振动沉桩对旧桥桩基轴力的影响较小。

3.3.2 桩基位移影响

18#墩与 19#墩桩基在不同沉桩深度下的位移计算结果如下表所示。

表 3 位移计算结果

沉桩深度 (m)	19#墩 x 向位移 (mm)	19#墩 y 向位移 (mm)	18#墩 x 向位移 (mm)	18#墩 y 向位移 (mm)
10	0.229	0.235	0.082	0.206

沉桩深度 (m)	19#墩 x 向位移 (mm)	19#墩 y 向位移 (mm)	18#墩 x 向位移 (mm)	18#墩 y 向位移 (mm)
20	0.175	0.073	0.021	0.143
26	0.087	0.041	0.080	0.309

规范要求既有桥梁桩基施工附加位移限值为 5mm，模拟结果中最大位移为 0.309mm，仅为限值的 6.18%，表明振动沉桩对旧桥桩基位移的影响可忽略不计。

综合分析可知，在严格控制振动锤参数的前提下，钢管桩振动沉桩对旧桥的影响均在安全范围内，可通过科学选型振动锤实现安全施工。

4 振动锤选型核心技术

4.1 激振力选型

激振力是决定钢管桩能否顺利沉入设计深度的关键参数，需满足 $F > T_v$ (T_v 为土层极限动摩擦阻力)。土层极限动摩擦阻力计算公式为：

$$T_v = L \times \sum(\tau_i \times H_i)$$

式中： L 为钢管桩内外壁总周长 (m)； τ_i 为第 i 层土的桩侧极限摩阻力 (kPa)； H_i 为第 i 层土中钢管桩入土深度 (m)。同时，激振力与振动体系质量 (振动锤、夹持器、钢管桩总质量) 的比值需控制在 53~103 范围内，确保振动效率与稳定性。本工程主要采用 $\Phi 820 \times 10\text{mm}$ 及 $\Phi 630 \times 10\text{mm}$ 钢管桩，以 $\Phi 820 \times 10\text{mm}$ 钢管桩为例计算：外径 $D=820\text{mm}$ ，壁厚 $d=10\text{mm}$ ，内外壁总周长 $L=2.576+2.513=5.089\text{m}$ ；结合地质资料，各土层参数代入计算得：

$$T_v = 5.089 \times (4 \times 9.85 + 8 \times 16.65 + 30 \times 2.9) = 668\text{KN}$$

考虑到沿海潮差导致的桩身附加阻力，预留 13% 的安全储备，确定所需最小激振力为 755KN。若地勘资料缺失摩阻力参数，可采用标准贯入值 N 估算，计算公式为：

$$F = \sum(H_i \times N_i^2) \times L$$

代入数据计算得 $F=547\text{KN}$ ，结合安全储备，最终确定激振力需不小于 755KN。

4.2 振幅选型

振幅直接影响土体液化效果，需满足 $A_0 < A < A_c$ (A_0 为起始振幅， A_c 为极限振幅)。起始振幅是实现沉桩的最小振幅，可根据标准贯入击数 N 计算：

$$A_0 \geq N/12.5 + 3$$

桩端土层 $N=40$ ，代入得 $A_0 \geq 40/12.5 + 3 = 6.2\text{mm}$ 。结合不同土质的最小振幅要求，沿海水下砂质土最小振幅需 $\geq 2\text{mm}$ ，粘性土需 $\geq 6\text{mm}$ ，本工程选取振幅 $\geq 7\text{mm}$ 的振动锤，既满足起始振幅要求，又能确保沉桩效率。

4.3 偏心距确定

偏心距决定振动锤的激振效果，在确定起始振幅 A_0 后，偏心距 K 需满足：

$$K \geq A_0 \times (QB + QC) \times g$$

式中： g 为重力加速度（ $9.8m/s^2$ ）。

代入 $A_0=6.2mm$ 、 $QB+QC=11873kg$ ，计算得：

$$K \geq 6.2 \times 10^{-3} \times 11873 \times 9.8 = 721.40N \cdot m$$

4.3 频率选型

振动频率需与土层固有频率匹配，以实现土体高效液化。不同地层对应的适宜频率如下表所示。

表 5 不同地层对应的适宜频率

地层类型	适宜频率范围 (Hz)	振幅范围 (mm)
淤泥、淤泥质土	14.32~15.91 (中频)	7~20
中砂	15.91~19.10 (中频-高频)	3~8
强风化花岗岩	≥ 25 (高频)	3~8

本工程土层分布复杂，需兼顾不同地层的沉桩需求，选取振动频率为 16.67Hz（1000r/min）的振动锤，该频率覆盖淤泥质土与中砂层的适宜频率范围，通过调整振幅可适配强风化花岗岩层施工。结合上述计算，最终选定 DZ90 型液压振动锤，其核心技术参数如下表所示，各项指标均满足选型要求。

5 工程实践与效果验证

5.1 施工工艺优化

结合有限空间施工要求，优化振动沉桩施工工艺：①采用 75T 履带吊配合小型导向架，减小设备作业半径，确保与旧桥桩基的安全距离；②采用“分层振动、逐级沉桩”工艺，在淤泥层采用高振幅、低频率，砂层采用低振幅、高频率，强风化花岗岩层采用间歇振动，避免桩身损伤；③利用涨潮期进行沉桩，利用潮水浮力减小桩身自重带来的沉桩阻力；④在旧桥桩基附近设置振动监测点，实时监测振动速度与位移，确保施工安全。

5.2 效果验证

5.2.1 沉桩效率验证

采用 DZ90 型振动锤施工， $\Phi 820 \times 10mm$ 钢管桩平均沉桩时间为 45min/根， $\Phi 630 \times 10mm$ 钢管桩平均沉桩时间为 30min/

根，较计划工期提前 12% 完成主栈桥搭设，沉桩效率满足工程进度要求。所有钢管桩均顺利沉入设计深度，桩身垂直度偏差控制在 0.5% 以内，符合规范要求。

表 7 承载力检测

桩型	检测桩数 (根)	平均极限承载力 (KN)	设计极限承载力 (KN)	满足度 (%)
$\Phi 820 \times 10mm$	8	3860	3200	120.6
$\Phi 630 \times 10mm$	7	2580	2100	122.9

检测结果表明，钢管桩极限承载力均超过设计值 20% 以上，承载性能稳定，满足栈桥施工荷载要求。

5.2.3 旧桥安全监测

施工期间，在旧桥 18#、19#墩布设 6 个振动监测点、4 个位移监测点，实时监测数据显示：最大振动速度为 2.3cm/s，远小于规范允许的 5cm/s；最大累计位移为 0.32mm，与数值模拟结果基本一致，旧桥结构未出现任何异常，施工安全得到有效保障。

6 结论与展望

6.1 结论

(1) 沿海地区复杂环境与有限空间下，振动锤选型需综合考虑地质、水文、周边构筑物及设备作业限制，建立“激振力-端阻阻力-振幅-偏心距-频率”多参数协同选型体系，确保选型方案的科学性与合理性。(2) 数值模拟可有效预测振动沉桩对邻近旧桥桩基的影响，亭角大桥工程中，沉桩导致的旧桥桩基附加轴力增幅 $\leq 1.12\%$ 、最大弯矩 $\leq 8.60KN \cdot m$ 、最大位移 $\leq 0.309mm$ ，均控制在安全范围内。(3) 选定的 DZ90 型振动锤适配本工程施工需求，结合优化后的施工工艺，实现了钢管桩安全高效沉桩，沉桩效率提升 12%，钢管桩承载力满足设计要求，旧桥结构安全稳定。

6.2 展望

本研究提出的振动锤选型方法与施工技术，为沿海复杂环境及有限空间下钢栈桥钢管桩施工提供了成功案例。后续可进一步开展智能化振动锤选型研究，结合 BIM 技术与实时监测数据，建立动态选型模型，实现振动锤参数的精准匹配与自适应调整，进一步提升施工效率与安全水平。同时，可加强振动沉桩对周边水体环境影响的研究，为绿色施工提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 胥新伟,时闽生,刘亚平.振动锤沉桩计算方法[J].中国港湾建设,2015(5):41-44.
- [2] 胡均平,唐勇,罗春雷,等.影响振动锤沉桩能力的土力因素分析[J].建筑机械,2006(4):80-81.