

受限空间桩基施工影响因素敏感性分析

蒋赢达

(上海公路投资建设发展有限公司, 上海市 200335)

摘要: 城市多层高架立体改扩建工程中, 新建桩基常处于既有桥梁下方或紧邻既有结构, 施工空间严重受限, 施工效率与质量控制难度显著增大。为此, 从空间几何约束、设备适配性、施工工艺、地质条件、组织管理5个维度, 系统识别受限空间桩基施工的关键影响因素; 依托上海外环西段工程, 采用单因素敏感性分析法, 以单桩施工周期为评价指标, 计算各因素敏感度系数 β , 定量判别各因素对施工效率的影响程度; 并针对钻孔、钢筋笼下放、混凝土浇筑等关键工序提出分级控制措施, 为同类受限空间桩基施工效率提升与质量保障提供参考。

关键词: 受限空间; 桩基施工; 敏感性分析; 敏感度系数; 分级控制

中图分类号: U445; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0389-04

Analysis on Sensitivity of Influencing Factors in Pile Foundation Construction in Confined Spaces

JIANG Yingda

(Shanghai Highway Investment, Construction and Development Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: In the three-dimensional reconstruction and expansion of urban multi-story elevated structures, the new pile foundations are often located under existing bridges or adjacent to existing structures, resulting in severely restricted construction space and significant challenges to construction efficiency and quality control. Therefore, the key influencing factors of pile foundation construction in confined spaces are systematically identified from five dimensions of spatial geometric constraints, equipment adaptability, construction technology, geological conditions and organizational management. Relying on the Shanghai Outer Ring West Section Project, the single-factor sensitivity analysis method is adopted with the single pile construction period as the evaluation index to calculate the sensitivity coefficient β of each factor and quantitatively determine the impact of each factor on construction efficiency. And aiming at the key processes of drilling, lowering of steel cages, and pouring concrete, the grading control measures are proposed, providing a reference for improving construction efficiency and ensuring quality in similar confined-space pile foundation projects.

Keywords: confined space; pile foundation construction; sensitivity analysis; sensitivity coefficient; grading control

0 引言

随着我国城市土地资源日趋紧张, 既有城市桥梁的扩容方式已由平面拓宽转向立体改扩建^[1]。多层高架体系能够在有限用地条件下成倍提升交通通行能力, 成为大城市快速路改造的首选方案。然而, 多层高架意味着新建结构位于既有桥梁的上方或夹层之中, 桩基施工需面临净空不足、作业面狭窄、设备回转受限等空间约束, 施工难度显著增大^[2-3]。

目前国内外针对受限空间桩基施工的研究多集

中于施工工艺优化、专用设备改造、既有结构防护等方面^[3-6], 但以敏感度系数定量分析空间几何、设备、地质、管理等多因素对施工周期影响程度的研究较少, 尤其缺乏针对上海软土地区双层高架夹层狭小场地的系统性量化分析。为此, 本文以上海外环西段工程为依托, 系统识别关键影响因素, 采用单因素敏感性分析法定量判别敏感度, 建立分级控制策略, 为同类工程提供参考。

1 工程简介

1.1 项目概况

外环西段交通功能提升工程是上海市重大交通基础设施项目。土建施工3标主线高架全长1 935 m,

收稿日期: 2026-05-11

作者简介: 蒋赢达(1985—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事公路、市政工程项目管理工作。

起于临虹路, 终至泉口路。工程主要内容包括: 现状路基段抬升新建高架、北翟路立交改造、天山西路桥梁拆除重建等。

1.2 受限空间桩基施工影响因素

关键空间约束集中于 ZX124#—ZX125#墩区域, 如图 1 所示。该区域的施工环境具有以下特征:

新建桩基位于既有外环线北翟路桥与北翟路高架桥之间的狭长区域;

两侧既有梁体边线之间的场地宽度 $W=5.2\text{ m}$ (核心受限因素);

桩中心距离两侧桥边均为 $d=1.3\text{ m}$;

施工现场存在既有匝道立柱, 进一步压缩了设备回转空间。

在上述空间约束下, 桩基施工面临以下突出问题:

(1) 钻孔作业困难: 场地宽度仅 5.2 m , 常规回旋钻机机身宽度约 $2.5\sim 3.0\text{ m}$, 就位后与两侧梁体间距不足 1.0 m , 摆位及移位调整极为困难, 钻进过程中机架易与两侧梁体发生碰撞。

(2) 钢筋笼下放受限: 场地宽度狭窄且存在既有匝道立柱, 汽车吊进入困难, 回转臂难以转动。钢筋笼需分节吊装, 每节对接时间增加约 40% 。

(3) 混凝土浇筑组织难度大: 混凝土泵车无法进入狭窄区域, 需采用地泵加长泵管进行浇筑, 泵管弯头数量增加导致堵管概率上升, 单根桩浇筑时间较常规工况延长约 35% 。

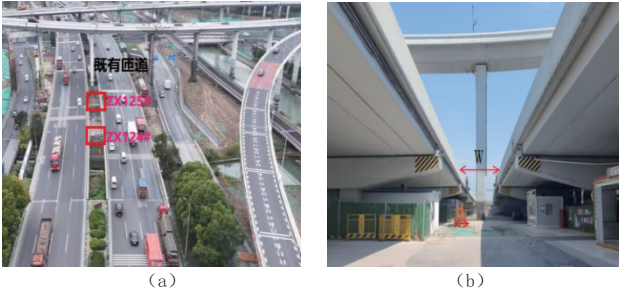


图1 ZX124#—ZX125#施工空间图

2 影响因素的识别

基于现场调研和文献查阅, 从“人—机—料—法—环”5个维度, 系统识别出受限空间桩基施工的15项初始影响因素。采用经验筛选法, 按照变异性、可控性、独立性3项标准进行筛选, 最终保留5项核心独立因素, 如表1所示。

3 敏感性分析方法

3.1 方法原理

敏感性分析是研究不确定性因素变动对评价指

表1 受限空间桩基施工核心影响因素

因素编码	因素名称	符号	单位/等级	基准值	筛选理由
X1	场地宽度	W	m	5.2	两侧梁体间距离, 核心受限因素
X2	桩位侧距	d	m	1.3	桩中心至桥边距离
X3	设备选型	E	等级	E_2 (低净空/窄机身钻机)	可控, 不同选型成本差异显著
X4	地质条件	G	等级	G_2 (中等硬度)	变异性大, 不可控
X5	组织管理	M	等级	M_2 (良好水平)	可控, 投入差异大

注: 定性因素等级量化——设备选型: E_1 =常规钻机(机身宽 3.0 m), E_2 =窄机身钻机(机身宽 2.2 m), E_3 =微型钻机(机身宽 1.8 m); 地质条件: G_1 =软土, G_2 =中等硬度, G_3 =硬土/碎石; 组织管理: M_1 =一般水平, M_2 =良好水平, M_3 =优秀水平。

标影响程度的方法^[7]。本文采用单因素敏感性分析法, 在保持其他因素不变的条件下, 逐一改变目标因素的取值, 计算评价指标的响应幅度, 进而得到敏感度系数 β 。

敏感度系数 β 的计算公式为:

$$\beta = \frac{|\Delta Y/Y_0|}{|\Delta X/X_0|}$$

式中: X_0 为因素 X 在基准工况下的取值; ΔX 为因素 X 的变化量; Y_0 为评价指标在基准工况下的取值; ΔY 为评价指标随因素 X 变化的绝对变化量。

敏感度等级划分标准: $\beta \geq 1.0$ 为高敏感(指标变化幅度大于或等于因素变化幅度), $0.5 \leq \beta < 1.0$ 为中敏感(指标变化幅度为因素的 $50\% \sim 100\%$), $\beta < 0.5$ 为低敏感(指标变化幅度小于因素的 50%)。

3.2 评价指标选取

选取单根桩基施工总周期 T (单位: h)作为评价指标。 T 涵盖三大工序: 钻孔成型时间 T_1 (含钻机就位、钻进、清孔、移位调整)、钢筋笼下放时间 T_2 (含吊装、对位、连接、下放)、混凝土浇筑时间 T_3 (含泵管布置、浇筑、堵管处理)。

基准工况下($W=5.2\text{ m}$, $d=1.3\text{ m}$, E_2 , G_2 , M_2), 经现场12根桩的实测统计, 平均施工周期 $T=24.5\text{ h}$, 其中 $T_1=13.2\text{ h}$, $T_2=5.8\text{ h}$, $T_3=5.5\text{ h}$ 。

3.3 变动范围设定

各因素变动范围参考现场实测数据、设备参数极限和工程经验设定: W 为 $3.5 \sim 7.0\text{ m}$ (两侧梁体间距), d 为 $0.8 \sim 2.0\text{ m}$ (桩中心至桥边距离), 设备选型按 E_1 、 E_2 、 E_3 共3档, 地质条件按 G_1 、 G_2 、 G_3 共3档, 组织管理按 M_1 、 M_2 、 M_3 共3档。

4 敏感性计算与结果分析

4.1 单因素变动下的施工周期变化

采用现场实测数据与设备工效统计测算,计算各因素在不同变动幅度下的施工周期 T ,结果如表 2 所示。

表 2 单因素变动下的施工周期 T 单位:h					
因素	变动幅度	取值	T	ΔT	变化率/%
W	-30%	3.64 m	31.5	+7.0	+28.6
	-15%	4.42 m	27.6	+3.1	+12.7
	0	5.20 m	24.5	0	0
	+15%	5.98 m	21.8	-2.7	-11.0
	+30%	6.76 m	19.5	-5.0	-20.4
d	-30%	0.91 m	27.5	+3.0	+12.2
	-15%	1.11 m	25.9	+1.4	+5.7
	0	1.30 m	24.5	0	0
	+15%	1.50 m	23.3	-1.2	-4.9
	+30%	1.69 m	22.3	-2.2	-9.0
E	E_1	常规钻机 (宽 3.0 m)	29.5	+5.0	+20.4
	E_2	窄机身钻机 (宽 2.2 m)	24.5	0	0
	E_3	微型钻机 (宽 1.8 m)	22.5	-2.0	-8.2
G	G_1	软土	25.8	+1.3	+5.3
	G_2	中等硬度	24.5	0	0
	G_3	硬土/碎石	23.6	-0.9	-3.7
M	M_1	一般水平	26.5	+2.0	+8.2
	M_2	良好水平	24.5	0	0
	M_3	优秀水平	23.0	-1.5	-6.1

注: W 和 d 的变化数据基于现场 12 根桩的分组统计拟合; E 、 G 、 M 的变化数据基于工效调研^[4-5,8]。

4.2 敏感度系数计算

根据表 2 数据及 β 公式,计算各因素的敏感度系数,结果如图 2 所示。

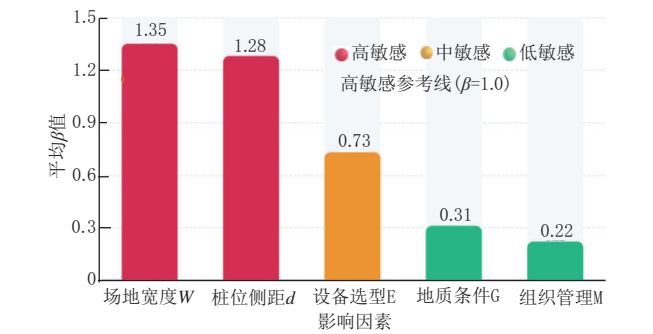


图 2 各因素敏感度系数及敏感等级

4.3 结果分析

4.3.1 敏感性排序

依据平均 β 值,5 个因素的敏感度排序为: W (1.35) > d (1.08) > E (0.73) > G (0.31) > M (0.22)。

4.3.2 高敏感因素分析

场地宽度 W 的 β 值最高 (1.35), 意味着当 W 变动 1% 时, 施工周期同向变动约 1.35%, 在所有因素中影响最为显著。机理分析表明: W 对钻机就位和移位调整工序影响最大。当 W 从 5.2 m 缩减至 3.64 m (-30%) 时, 钻机两侧与梁体间距不足 0.7 m, 钻机摆位极为困难, 移位调整时间增加约 60%, 钻孔时间增幅达 40% 以上^[3-4,8]。

桩位侧距 d 的 β 值为 1.08, 属于高敏感因素。当 d 从 1.3 m 缩至 0.91 m (-30%) 时, 桩位过于靠近桥边, 钻机钻孔时易碰撞梁体, 钢筋笼下放时吊臂摆动空间不足, 下放时间增幅约 30%^[5-6]。

4.3.3 中敏感因素分析

设备选型 E 的 β 值为 0.73, 属于中等敏感。从 E_1 (常规钻机, 机身宽 3.0 m) 升级为 E_2 (窄机身钻机, 机身宽 2.2 m) 可使施工周期缩短 20.4%, 但进一步升级为 E_3 (微型钻机, 机身宽 1.8 m) 仅再缩短 8.2%, 边际效益递减。说明在场地宽度受限条件下, 选用窄机身钻机是性价比最高的选择^[4]。

4.3.4 低敏感因素分析

地质条件 G 和组织管理 M 的 β 值均小于 0.5, 属于低敏感因素。在受限空间条件下, 场地几何约束是主导因素, 地质条件和管理水平提升对总工期的调节作用相对有限^[7]。

5 分级控制策略与应用效果

5.1 分级控制策略

基于敏感性排序, 建立分级控制策略体系, 如表 3 所示^[9]。

表 3 基于敏感性排序的分级控制策略				
敏感等级	因素	β 值	控制措施	投入优先级
高	W	1.35	①选用窄机身钻机(机身宽 ≤ 2.2 m); ②优化钻机摆位轨迹; ③设置防碰撞预警装置	★★★★★
高	d	1.08	①BIM 模拟最优桩位布置; ②钢筋笼分段预制(2~3 段); ③小型化吊具	★★★★☆
中	E	0.73	设备选型遵循“够用原则”; 备用设备就位	★★★☆☆
低	G	0.31	地质超前探测; 钻进参数动态调整	★★☆☆☆
低	M	0.22	作业班组定岗定责; 工序衔接优化	★★☆☆☆

5.2 现场应用效果

将上述控制策略应用于 ZX124#—ZX125# 墩的

14根桩基施工,重点控制高敏感因素:

针对场地宽度 $W=5.2\text{ m}$,选用窄机身回旋钻机(机身宽度 2.2 m ,较常规钻机窄 0.8 m)。

针对桩位侧距 $d=1.3\text{ m}$,施工前进行BIM摆位模拟,确定钻机和吊机的最优站位轨迹,钢筋笼按2段预制(标准段 9 m +调整段 6 m)。应用效果对比如表4所示。

表4 控制前后效果对比			
指标	控制前 (12根桩)	控制后 (14根桩)	改善幅度/%
平均施工周期 T	24.5 h	15.9 h	-35.1
钻孔时间 T_1	13.2 h	8.0 h	-39.4
钢筋笼下放时间 T_2	5.8 h	4.0 h	-31.0
浇筑时间 T_3	5.5 h	3.9 h	-29.1
设备碰撞报警次数	4.2次/桩	0.6次/桩	-85.7
钻机就位调整时间	2.5 h/桩	1.2 h/桩	-52.0

结果表明:施工周期缩短35.1%,验证了优先控制高敏感因素的投入产出效益最优;钻孔时间改善幅度最大(-39.4%),与场地宽度 W 的高敏感度($\beta=1.35$)高度一致;设备碰撞报警次数下降85.7%,说明窄机身钻机和BIM模拟对优化施工条件效果显著^[3-4]。

6 结 语

(1)系统识别了受限空间(两桥之间狭长区域)桩基施工的5类关键影响因素:场地宽度(W)、桩位侧距(d)、设备选型(E)、地质条件(G)、组织管理(M)。经单因素敏感性分析,得到敏感度系数分别为 $\beta=1.35、1.08、0.73、0.31、0.22$,排序为 $W>d>E>G>M$ 。

(2)场地宽度是最敏感的影响因素($\beta=1.35$),其

微小变动会引发施工周期大幅波动。当两侧梁体间距小于 4.5 m 时,施工效率呈加速下降趋势。建议在方案设计阶段尽可能为桩基施工预留充足的场地宽度,避免后期通过设备选型弥补设计缺陷。

(3)建立了分级控制策略体系:高敏感因素($W、d$)应投入优势资源,中敏感因素(E)遵循“够用原则”,低敏感因素($G、M$)采取常规管理。现场应用表明,优先控制高敏感因素可使施工周期缩短35.1%,验证了策略的有效性。

(4)本文建立的敏感性分析框架可推广至其他受限空间施工场景(如隧道内桩基、地下连续墙槽段、既有建筑间狭小场地等),为方案比选和风险预控提供量化决策依据。

参考文献:

[1] 李伟.市政桥梁桩基础施工关键技术及质量控制要点研究[J].运输经理世界,2024(36):98-100.

[2] 程辉.公路桥梁桩基础施工工艺及质量控制研究[J].汽车周刊,2024(10):154-156.

[3] 陈发文,王孝生,白海珠,等.受限条件下的桥梁桩基及承台施工技术[J].建筑施工,2022,44(12):2872-2874;2878.

[4] 张德波.受限空间条件下高速公路桥桩基加固技术研究[J].建筑技术开发,2019,46(4):104-106.

[5] 杨丽权.现役高速公路桥梁桩基加固实践[J].黑龙江交通科技,2021,44(11):58-59.

[6] 郑昭.受限空间条件下高速公路桥桩基加固技术探究[J].建材发展导向(上),2020,18(4):179.

[7] 姜早龙.工程经济学[M].南京:中南大学出版社,2005.

[8] 刘强.T型高墩现浇盖梁施工技术研究[J].工程建设与设计,2019(15):219-221;227.

[9] 张馨锐,张磊,刘辉.单因素敏感性分析在投资项目中的应用[J].产业与科技论坛,2017,16(23):41-42.

(上接第389页)

绵城市建设硬性要求。后续需融合国外先进材料与装备技术,围绕透水型拉毛混凝土改性研发、施工工艺智能化优化、标准化培训体系构建等方向开展研究,推动相关行业标准制定。本研究成果为国内同类工程提供了全流程技术指导,对全球城市慢行系统高质量建设具有重要的实践指导意义与推广价值。

参考文献:

[1] 廖朴.压花混凝土人行道养护关键技术与实践探讨[J].江西建材,2025(11):398-400.

[2] GB 55011—2021 城市道路交通工程项目规范[S].

[3] CJJ 169—2012 城镇道路路面设计规范[S].

[4] Rajani B.混凝土人行道的性能[J].方红云(译).安徽建筑,2008(5):88-90.

[5] 琚泽舟.浅谈彩色压模混凝土在人行道铺装中的应用[J].建材发展导向,2020,18(1):157.

[6] 熊壮,王伟.压印混凝土在市政道路中的应用研究[J].工程设备与材料,2024(8):112-114.

[7] 朱志强.压模混凝土艺术地坪施工工艺[J].福建交通科技,2005(2):19-21.

[8] 张珍贵,李东.人行道压印艺术地坪施工技术及裂缝防治[J].四川水力发电,2015(1):22-24;30.

[9] 翟雷,罗伟,王贺,等.彩色混凝土艺术地坪施工技术[J].建筑技术,2021,52(2):157-160.

[10] 郑婉灵.人行道压印混凝土施工过程中的关键技术分析[J].中国水泥,2024(8):120-122.

[11] 刘廷秀.人行道压模混凝土的施工工艺优化与质量控制[J].建筑与装饰,2024,11(2):115-117.

[12] 廖瑞天.混凝土艺术压模施工在人行道铺装中的应用[J].建筑机械化,2025(4):180-186.

[13] 杨中委,陈涛.红星路南延线人行道彩色压印混凝土施工技术[J].四川水力发电,2015(1):58-60.

[14] CJJ 1—2008 城镇道路工程施工与质量验收规范[S].