

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20241019001

文章编号: 1674-599X(2025)02-0086-11

引用格式: 薄其睿, 李成川, 尚文昌, 等. 海上锤击沉桩过程对既有引桥影响研究[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(2): 86-96.

Citation: BO Qirui, LI Chengchuan, SHANG Wenchang, et al. Influence of sinking piles with hammer at sea on the existing approach bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 86-96.

海上锤击沉桩过程对既有引桥影响研究

薄其睿¹, 李成川², 尚文昌¹, 高昌², 刘俊伟¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266525; 2. 青岛港建设管理中心有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要:【目的】探讨海上大直径开口钢管桩锤击沉桩对邻近既有引桥的影响, 确保施工安全与质量, 维护引桥稳定。【方法】采用高精度现场监测技术, 对沉桩过程中引桥的振动、水平位移进行实时监测。【结果】既有引桥主要受竖直方向的振动和顺桥方向水平位移的影响, 尤其是振源附近的桥墩, 其响应更为显著。通过多元线性回归分析, 揭示了振动速度峰值与打桩距离、贯入深度之间的关系。具体来说, 在振源附近, 打桩距离和贯入深度的回归系数分别为-0.635和0.568, 表明振动速度随着打桩距离的增大而减小, 随着贯入深度的增大而增大。相反, 在远离振源的区域, 打桩距离和贯入深度的回归系数分别为0.678和-0.422, 表明振动速度随着打桩距离的增大而增大, 随着贯入深度的增加而减小。此外, 引桥的水平位移也随着打桩距离的增大而减小, 尤其是在振源附近的桥墩, 其水平位移更为显著。水平位移随贯入深度的增加呈先增大后减少的变化趋势, 特别是在桩基入岩时, 水平位移达到了峰值。【结论】揭示了土层-结构相互作用下位移与振动的复杂性, 可为海上沉桩施工提供实时数据支持, 也可类似工程的安全控制与质量保障提供科学依据。

关键词: 锤击沉桩; 大直径开口管桩; 现场监测; 既有引桥影响; 多元线性回归

中图分类号: TV221

文献标志码: A

Influence of sinking piles with hammer at sea on the existing approach bridge

BO Qirui¹, LI Chengchuan², SHANG Wenchang¹, GAO Chang², LIU Junwei¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Port Construction Management Center Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: [Purposes] This study aims to explore the influence of large-diameter open-ended steel pipe sinking piles with hammers at sea on adjacent existing approach bridge, ensuring construction safety and quality while maintaining the stability of the approach bridge. [Methods] High-precision on-site monitoring technology was employed to real-time monitor the vibration and horizontal displacement of the approach bridge during the pile sinking process. [Findings] The existing approach bridge is mainly affected by vertical vibration and horizontal displacement in the bridge direction, especially the bridge piers near the vibration source, where the response is more significant. Through multiple linear regression analysis, the complex relationship between the peak vibration velocity and the pile driving distance and penetration depth is revealed. Specifically, near the vibration source, the regression coefficients for pile driving distance and penetration depth are -0.635 and 0.568, respectively,

收稿日期: 2024-10-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277135); 泰山学者工程专项经费资助项目(tsqn202211176); 国家自然科学基金-山东联合基金项目(U2006225)

通信作者: 刘俊伟(1983—), 男, 教授, 主要从事滨海岩土防灾减灾方面的研究工作。E-mail: liujunwei@qut.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

indicating that the vibration velocity gradually decreases with increasing pile driving distance while increasing correspondingly with increasing penetration depth. Conversely, in the area far away from the vibration source, the regression coefficients of pile driving distance and penetration depth are 0.678 and -0.422 , respectively, indicating that the vibration velocity increases with the increase in pile driving distance and decreases with the increase in penetration depth. In addition, the horizontal displacement of the approach bridge also decreases with the increase in pile driving distance, especially for the bridge piers near the vibration source, where the horizontal displacement is more significant. The horizontal displacement exhibits a trend of first increasing and then decreasing with penetration depth, reaching its peak when the pile foundation enters the rock. [Conclusions] This study reveals the complexity of displacement and vibration under soil-structure interaction, providing real-time data support for offshore pile sinking construction and offering a scientific basis for safety control and quality assurance of similar projects.

Key words: sinking pile with hammer; large-diameter open-ended pipe pile; on-site monitoring; influence of the existing approach bridge; multiple linear regression

桩基础的应用范围十分广泛,尤其是大直径钢管桩基础在海上引桥建设中的应用。随着海洋资源的深入开发,来自环境复杂多变、浪潮波动剧烈及地质条件不佳的海域的挑战逐渐增多。引桥建设对大直径、超长、深贯入及大承载力钢管桩的需求日益增长,推动了该技术在引桥领域的快速应用与发展。大直径钢管桩一般采用锤击沉贯的方法进行施工。锤击沉贯法具有施工效率高、适应性强、承载能力高等特点,但相较于静压法,锤击施工对邻近建(构)筑物的振动和破坏影响更大。因此,研究海上锤击沉桩过程对港口工程既有引桥的影响意义重大。

目前,对锤击沉桩所采用的研究方法主要有现场测试、模型试验和数值模拟^[1],且研究的重点主要集中在深入分析打桩过程对桩-土相互作用体系中力学特性的影响规律与机制上。董军锋等^[2]总结了建筑施工振动的常见类型,分析了打桩引起的振动特性、打桩振害与地震震害之间的区别及打桩振动对建筑物的影响。徐莉^[3]研究了锤击沉桩振动对土层孔隙水压力的影响,通过试验数据揭示了振动导致黏土层孔隙水压力急剧上升但快速消散的现象,并分析了振动对不同土层排水特性的影响。LUKPANOV等^[4]进行了一系列离心模型试验,研究了不同打桩施工条件下桩身应力的发展过程,发现打桩引起的振动显著降低了桩周侧的土应力,这与MACHAČEK等^[5]的研究结果相似。SOFISTE等^[6]、STAUBACH等^[7]通过数值模拟和模型试验分析了打

桩对相邻建筑沉降的影响。李怡闻等^[8]运用ANSYS软件,创建了考虑动力接触的桩-土相互作用动态模型。苏栋等^[9]通过建立三维有限元模型,研究打桩施工对既有隧道及地表振动的影响,发现隧道衬砌的振动速度受打桩深度和水平距离影响显著,并建议采用 12.5 mm/s 作为衬砌振动速度的预警值。徐通^[10]针对中山市某试验场建立了打桩振动冲击计算模型(该模型采用FLAC^{3D}非线性动力分析框架下的Mohr-Coulomb模型),并将模型计算结果与现场实际监测数据进行了对比,结果表明在建筑物安全评价中选择竖直方向的振动速度作为振动速度峰值是合理的。NOORI等^[11]对用于分析土动力特性的数值模型进行了研究,采用入射波加权法、吸收边界法和在桩周设置薄土层的方法模拟打桩引起的土体振动。SUN等^[12]通过实测数据和数值模拟研究了打桩施工对周围土壤和邻近桩基的振动响应,研究结果表明打桩引起的地面加速度与距离之间呈对数线性关系,且随着打桩深度的增加,邻近桩基的加速度响应显著减小。

目前,桥梁桩基础施工对既有结构影响的研究主要是通过先进的数值模拟软件进行的,而现场监测试验较少。李文静^[13]通过数值模拟分析了桥梁桩基础施工对邻近地铁隧道的影响,揭示了隧道拱底和拱腰变形随桩基础开挖深度的增大而先增大后减小的规律,并指出当开挖深度超过 12 m 后桥梁桩基础施工对地表变形的影响减弱。慕建刚等^[14]研究了桥梁桩基础施工对邻近给水管线的影响,通

过有限元软件模拟了不同施工工况下管线的变形,并提出了设置钢护筒等措施以满足管线的保护要求。章维明^[15]利用有限元软件模拟了桥梁桩基础施工对既有明挖隧道的影响,得到了隧道拱底和拱腰变形、地表沉降及桩周土体位移随桩基础开挖深度的变化规律。

减少锤击打桩施工振动危害的最经济、最有效的措施是在保护对象附近设置隔振沟。在此类结构的减振设计中,常采用沿振动传播路径的隔振方法,该方法较为直观。结合锤击打桩施工过程中的振动源和传播规律,将隔振措施分为振动源控制、传播过程控制和振动对象控制三种类型^[16]。WANG等^[17]对打桩引起的周围土体和邻近建筑物的振动以及隔振沟的效果进行了定量分析。李强^[18]建立了振动源-土层-隔振沟模型,分析了膨润土、橡胶和聚苯乙烯泡沫等材料的隔振效果,还监测了增加隔振沟后土壤的加速度、速度和位移响应,认为聚苯乙烯是最有效的隔振材料。

综上所述,目前学者们针对海上锤击沉桩对桩土间力学特性影响的规律与机制已经开展了大量研究并取得了一些研究成果,但针对海上锤击沉桩过程对邻近既有海工结构的影响的研究比较匮乏,尤其是在现场实测方面,亟待对其进行更深入、更系统的剖析。鉴于此,本文针对青岛某港口海上锤击沉桩过程对既有引桥的影响展开现场实测研究,实时监测锤击沉桩过程中既有引桥的振动、水平位移的变化规律,利用多元线性回归分析方法揭示锤击沉桩过程中影响因素对既有引桥振动的综合影响。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

本文所研究的工程位于青岛港某码头,拟建的码头引桥共设计了7个桥墩,其中0#桥墩为4根 $\varnothing 1\,500\text{ mm}$ 的灌注桩;1#桥墩为8根 $\varnothing 1\,800\text{ mm}$ 的灌注桩,混凝土的等级为C40F300;2#~6#桥墩为50根 $\varnothing 1\,500\text{ mm}$ 的钢管桩,包括45根斜桩,5根直桩,壁厚 $\delta=25\text{ mm}$,材质为Q355B,桩长37.5~40.0 m。钢管桩采用锤击沉桩的形式,打桩区毗邻1#既有引桥,锤击沉桩将会导致1#既有引桥发生振动和位移。本文取6#桥墩的3根钢管桩来研究锤击沉桩对

既有引桥的影响。6#桥墩与既有引桥的相对位置如图1所示。

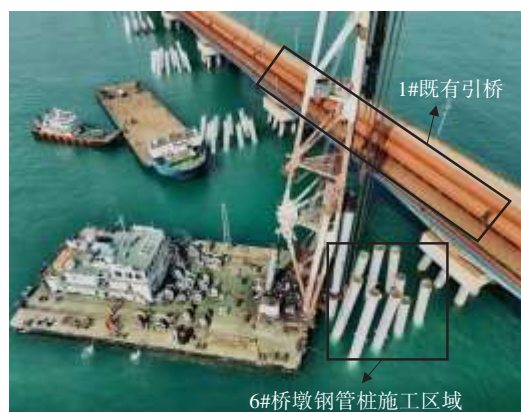


图1 6#桥墩钢管桩与既有引桥的相对位置

Fig. 1 Relative position of steel pipe pile of pier 6# and the existing approach bridge

1.2 地质条件

工程区域内的岩土层相对稳定,地质构造相对简单,根据地勘钻探结果,在该区域内未发现层位错乱、断层角砾岩、断层泥等代表断层特征的迹象,场地稳定。在钻探深度内岩土层的分布较有规律,6#桥墩施工区域的岩土层自上而下依次为:第一层为第四纪全新统海相沉积层(Q_4^m):①淤泥质粉质黏土,厚度为2.2 m;第二层为第四纪全新统海陆交互相沉积层(Q_4^{mc}):②粉质黏土、②₂粉土,厚度均为1.7 m;第三层为第四纪晚更新统陆相沉积层(Q_3^{al}):③₁粉质黏土、③₂中粗砂、③₃粉质黏土,厚度依次为2.6、1.3、1.3 m;第四层为燕山期风化岩(γ_3^f):④₁全风化岩、④₂强风化岩,全风化岩的厚度为1.0 m,全风化岩以下均为强风化岩。6#桥墩施工区域岩土层的分布示意图见图2。

2 锤击沉桩对既有引桥的影响机制

在沉桩过程中,重型锤击机械所引发的振源会在土体介质表面激发体波和面波,由于土体几何阻尼和材料阻尼,波在传播过程中会逐渐衰减。振动锤在锤击过程中对钢管桩产生了动力荷载,由于施加在振动桩上的荷载是循环往复的,故土体会发生循环剪切,并在桩端形成点振源,在桩身形成线振源^[19],一部分能量因为桩土之间的摩擦而损失,一部分能量由于桩端的贯入压缩而损失,剩余能量则产生应力波在周围土体中传播,沿着桩身产生剪切

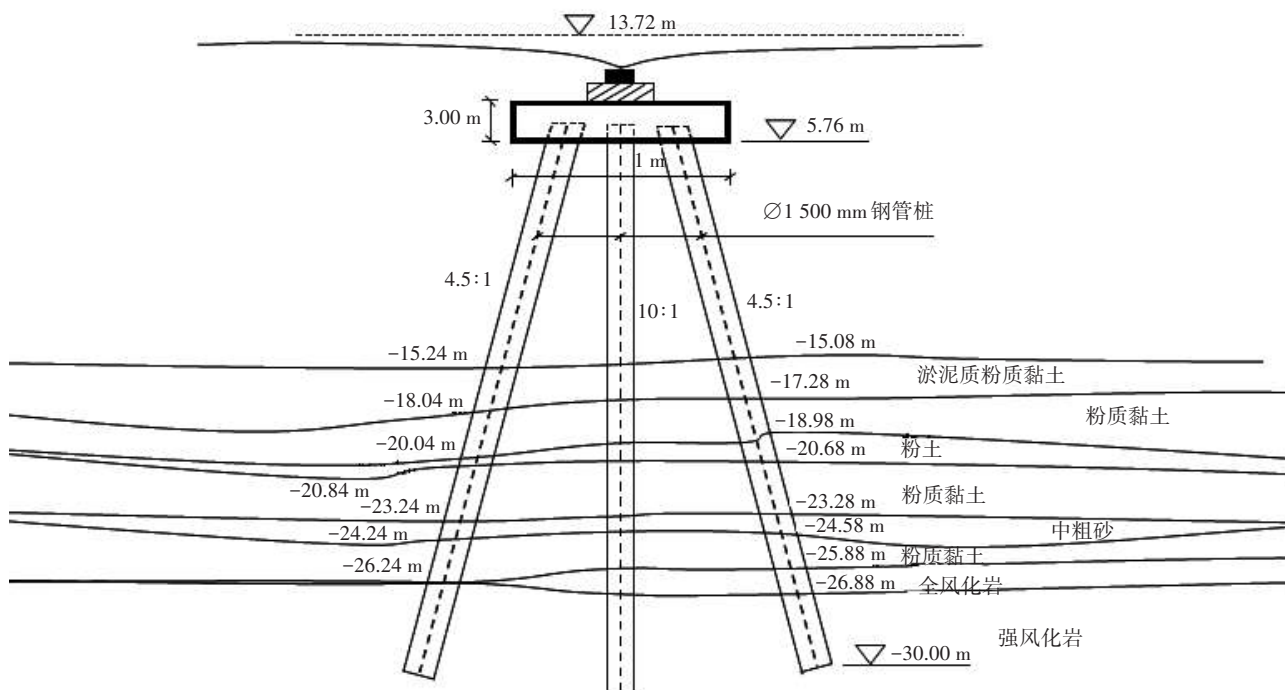


图2 6#桥墩施工区域岩土层的分布示意图

Fig. 2 Rock and soil layer distribution of pier 6#

波,在桩端产生压缩波,在远场产生面波,如图3~4所示。在近场主要为体波的叠加,在远场主要是体波与面波的干涉。打桩在周围土体中产生的波会引起地面振动,相当于施加了附加动荷载,产生了附加动应力和应变,使得周围土体的性状发生改变,进而可能导致临近建(构)筑物发生失稳及破坏。研究表明,水平径向振动最大,竖向振动次之,水平切向振动最小^[20]。打桩所产生的地面振动的传递是一个复杂的振动波运动过程,且沉桩所引起的地面振动在近场比在远场衰减得快。

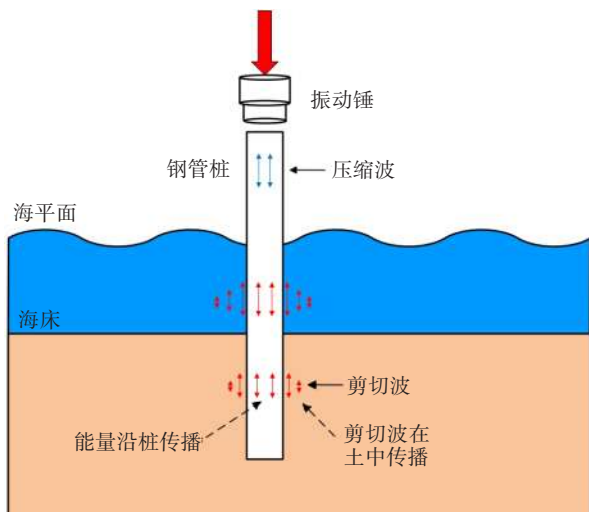


图3 锤击沉桩产生的压缩波和剪切波

Fig. 3 Compression and shear waves generated by sinking a pile with a hammer

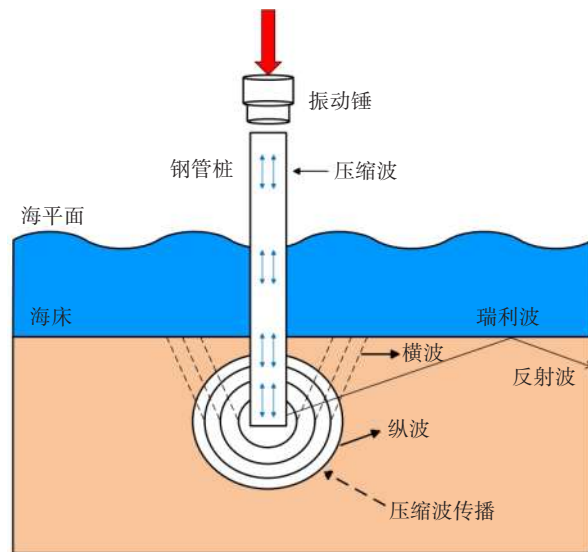


图4 桩端应力波的传播方式

Fig. 4 Propagation mode of stress waves generated at pile end

3 锤击沉桩过程中对既有引桥的监测

3.1 测点布置

在既有引桥 3#桥墩和 6#桥墩的对应桥面上安装测振仪和测斜仪各 1 个,以监测锤击沉桩过程中既有引桥的振动和位移。考虑到安装难度的问题,将仪器安装于桥墩正上方的桥面上,如图 5 所示。既有引桥承台与桥跨的结构特征见表 1,每个桥墩由 10 根 $\varnothing 1\,500\text{ mm}$ 的钢管桩组成,壁厚 $\delta=25\text{ mm}$,

材质为Q355B,桩长38.0~41.0 m。测振仪、测斜仪的技术参数见表2。测振仪监测 X 、 Y 、 Z 三个方向的振动,其中 X 方向为顺桥方向, Y 方向为横桥方向, Z 方向为竖直方向。测斜仪监测顺桥和横桥两个方向的位移。振动、位移监测贯穿整个码头的建设过程,不打桩时测振仪的触发电平为0.1 cm/s,测斜仪的监测间隔时间为30 min/次;在遇到特殊情况(如打桩)时则加密观测,此时将测振仪触发电平调为0.01 cm/s,将测斜仪的监测间隔时间调为2 min/次。在监测过程中若发生数据超标,则立即停止施工并采取相应措施。



图5 测振仪、测斜仪安装的具体位置

Fig. 5 Specific installation locations for vibrometer and inclinometer

表1 既有引桥承台与桥跨的结构特征

Table 1 Structural characteristics of pier cap and bridge span of the existing approach bridge m

承台底标高	承台高度	承台宽度	引桥跨度
5.76	3.00	15.00	64.00

表2 测振仪、测斜仪技术参数

Table 2 Technical parameters of vibrometer and inclinometer

仪器	精度	量程	采样频率
测振仪	0.001 cm/s	0.001 ~ 35.000 cm/s	1 000 ~ 100 000 次/s, 多档可调
测斜仪	0.001%FS	$\pm 15^\circ$	-

注:0.001%FS表示传感器测量值的误差相对于其满量程(full-scale)的百分比为0.001%

3.2 监测原理

3.2.1 振动监测

本文采用成都交博科技有限公司生产的L20-N测振仪进行振动监测。利用环氧树脂将监测仪刚性连接在桥面上。测振仪按照设定的采样频率连续记录振动的数据峰值,并通过设定的触发阈值获取超过该值的瞬时振动数据。

3.2.2 位移监测

本文采用进口石英挠性伺服加速度计作为敏感元件,并配置力平衡式伺服系统。当传感器相对于地球重心方向产生倾角 θ 时,由于重力的作用,传感器中的敏感元件相对于铅锤方向摆动一个角度,通过高灵敏的石英换能器将此角度转换成信号,然后经过数据分析处理显示被测点的水平位移。

4 监测结果与分析

本文重点研究新建6#桥墩6-3、6-7、6-5三根桩沉贯对既有引桥的影响。工程桩与既有引桥的位置关系如图6所示。

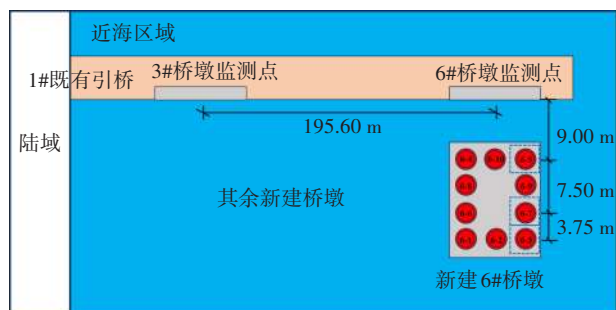


图6 工程桩与既有引桥的位置关系

Fig. 6 Position relationship between test pile and the existing approach bridge

振动及位移监测数据表明,在打桩过程中海上钢管桩锤击沉桩过程会给既有引桥带来不同程度的影响:①同一沉贯点对既有引桥不同位置的影响存在差异;②不同沉贯点对既有引桥的影响存在差异;③打桩贯入深度对既有引桥的影响存在差异。

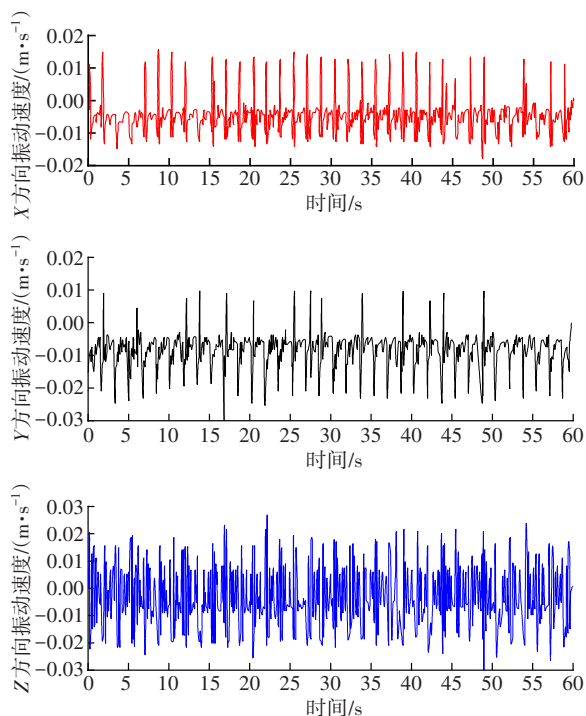
海上大直径开口钢管桩锤击沉桩施工流程主要包括:1)在打桩船定位后,运桩方驳将钢管桩运输至指定位置;2)通过移船吊桩将桩起吊并移至打桩船上,随后将桩垂直吊入桩锤的龙口并关闭下背板;3)在安套替打后,调整龙口的垂直度并测量定位,使桩依靠自重下沉,必要时进行微调以纠正偏位;4)拆除吊索后,压锤进行锤击沉桩,直至桩达到设计深度,其间进行打桩记录;5)停止锤击,起吊锤和替打,估测并记录桩的偏位情况。这一连续的施工流程确保了钢管桩的精确安装和稳定性。

4.1 既有引桥振动速度分析

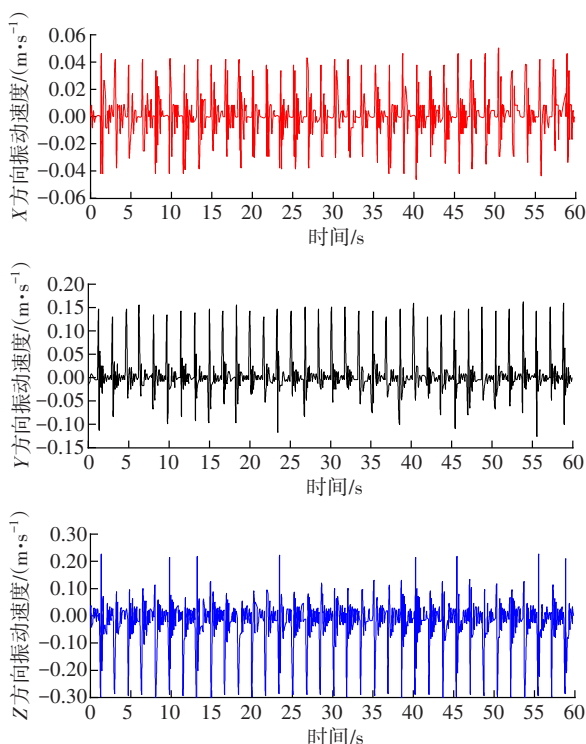
4.1.1 同一沉贯点对既有引桥不同位置的影响

本文以振动速度为研究对象,重点分析桩6-5的锤击贯入对既有引桥3#和6#桥墩的影响。图7

所示为某一时间点既有引桥3#和6#桥墩X、Y、Z方向的振动速度时程曲线。



(a) 3#桥墩X、Y、Z方向振动速度时程曲线



(b) 6#桥墩X、Y、Z方向振动速度时程曲线

图7 既有引桥3#和6#桥墩X、Y、Z方向振动速度时程曲线
Fig. 7 Time history curves of vibration velocity in X, Y, and Z directions of piers 3# and 6# of the existing approach bridge

由图7可知,在整个桩6-5的打桩过程中,既有引桥X、Y、Z方向的振动速度均随时间呈规律性的变化;Z方向上的振动响应比X、Y方向的大,且6#桥

墩更明显。竖直方向的冲击力通过桩身传递,对既有引桥竖直结构的影响较大,由于结构的刚性和阻尼效应,锤击贯入对既有引桥水平方向的影响相对较小。竖直打桩会改变地基的应力分布和土体的物理性质,导致地基压缩和沉降,进而影响既有引桥的垂直稳定性;水平方向的影响则因地基摩擦力和侧向约束相对较小。

图8~10所示为打入桩6-5前后及打入过程中,既有引桥3#和6#桥墩同一时刻的振动速度时程曲线。打桩前,桩因自质量沉贯入土中。由图8可知,在桩6-5因自质量贯入时,3#和6#桥墩的振动速度相近,且Z方向的振动速度出现激增。当桩自沉至某一深度不再下沉时,6#桥墩的振动速度恢复周期性变化,但变化幅度极小;3#桥墩的振动速度自始至终呈周期性变化,变化幅度不受桩自质量贯入的影响,这表明当引桥在一定距离处时不受打桩的影响。振动速度的周期性峰值和衰减由结构共振和阻尼特性导致,振动幅度在共振时增大,随后因阻尼作用而减小。外部激励的周期性变化也会使引桥振动具有周期性特征,表现为振动速度的周期性峰值和衰减。

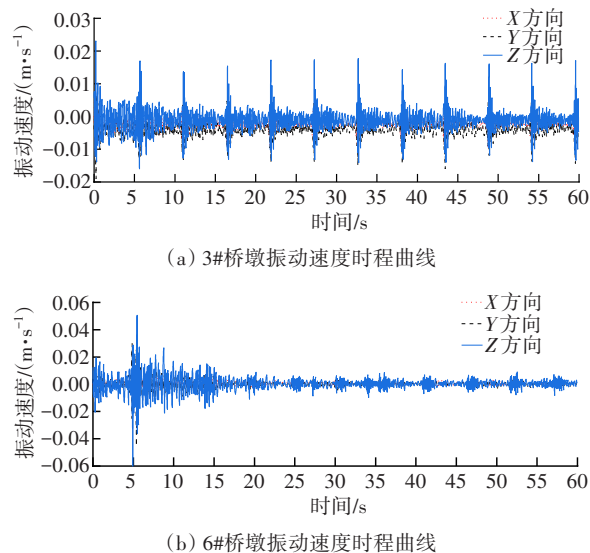
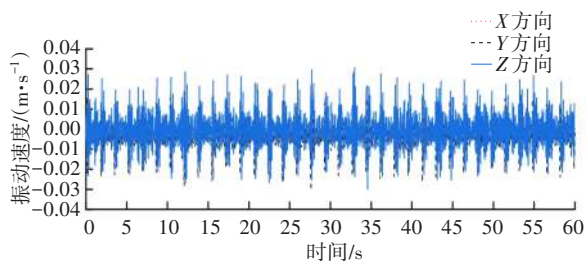


图8 桩6-5打入前既有引桥3#和6#桥墩同一时刻振动速度时程曲线

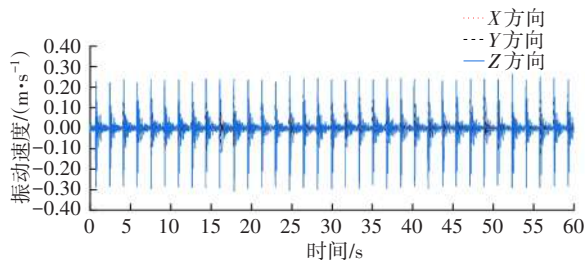
Fig. 8 Time history curves of vibration velocity at the same time for piers 3# and 6# of the existing approach bridge before pile 6-5 is driven in

由图9可知,在打桩过程中引桥振动速度呈现出周期性的波动,这是因为打桩机锤头的反复冲击使能量以波动的形式在桩身和周围土体中传递,进而引发了地表振动。6#桥墩靠近振源,振动速度的

峰值明显比3#桥墩的高。由于6#桥墩距离振源较近,由图10可知,在打桩结束后,振动源的移除导致既有引桥的振动速度迅速衰减,之后土体恢复至新的静态平衡。6#桥墩离打入桩较近,其初始振动能量大,且受土体惯性作用,6#桥墩的振动不会立即停止,而是逐渐减小至背景水平;3#桥墩离打入桩较远,振动在传播过程中经历了较多的衰减阶段,区域土体受到的扰动较小,其应力状态恢复迅速。在打桩结束时,桩端位于强风化岩内,该硬质土层限制了振动的传播,且桩身经过的粉质黏土及粉土的高阻尼特性使振动有所减小。



(a) 3#桥墩振动速度时程曲线



(b) 6#桥墩振动速度时程曲线

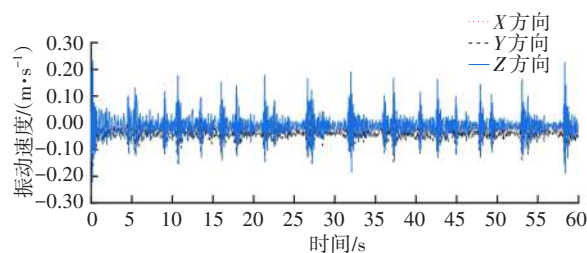
图9 桩6-5打桩过程中既有引桥3#和6#桥墩同一时刻振动速度时程曲线

Fig. 9 Time history curves of vibration velocity at the same time for piers 3# and 6# of the existing approach bridge during the pile driving process of pile 6-5

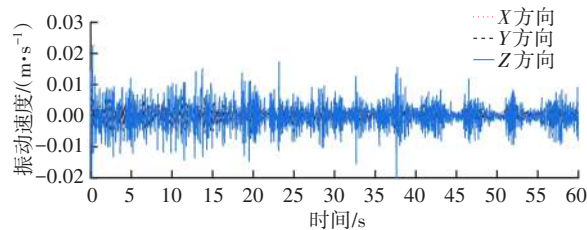
4.1.2 打桩距离及贯入深度对既有引桥的影响

锤击沉桩对既有引桥的关键影响因素为打桩距离和桩身贯入深度。现场试验所研究的3根工程桩到既有引桥的距离和贯入深度均不同,故本文通过构建多元线性回归模型,量化这两种因素对引桥的影响。

本文以振动速度为研究对象进行多元线性回归分析。首先分析3根工程桩对既有引桥6#桥墩的影响。在打桩过程中既有引桥6#桥墩的振动速度峰值与3根工程桩打桩距离和贯入深度的关系如图11所示(图中 D 为桩径)。建立自变量为打桩距离和贯入深度、因变量为既有引桥6#桥墩振动速度峰值(Z方向)的多元线性回归模型,分析结果见表3。



(a) 3#桥墩振动速度时程曲线



(b) 6#桥墩振动速度时程曲线

图10 桩6-5打桩结束时既有引桥3#和6#桥墩同一时刻振动速度时程曲线

Fig. 10 Time history curves of vibration velocity at the same time for piers 3# and 6# of the existing approach bridge at the end of pile driving for pile 6-5

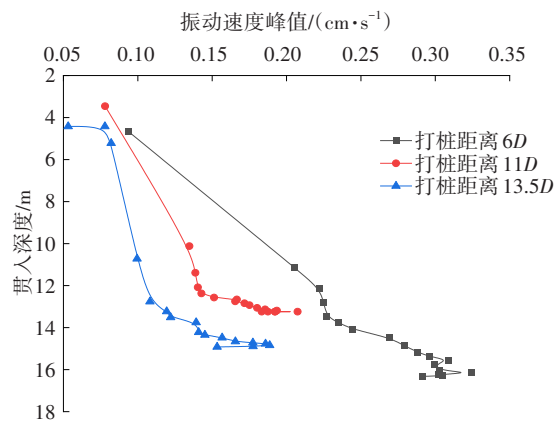


图11 既有引桥6#桥墩振动速度峰值与打桩距离、贯入深度的关系

Fig. 11 Relationship between peak vibration velocity of pier 6# of the existing approach bridge and pile driving distance and penetration depth of three engineering piles

表3 既有引桥6#桥墩多元线性回归分析结果

Table 3 Results of multiple linear regression analysis of pier 6# of the existing approach bridge

项目	回归系数	t	显著性	容差	方差膨胀系数
常量		9.603	<0.01		
打桩距离	-0.635	-14.965	<0.01	0.931	1.075
贯入深度	0.568	13.377	<0.01	0.931	1.075
F 值	73.116				
调整后的 R^2	0.913				
杜宾-沃森指数	1.956				

根据表3中的回归系数可得既有引桥6#桥墩振动速度峰值(Z 方向)与打桩距离、贯入深度的关系式为:

$$v_6 = -0.635x_6 + 0.568l_6 \quad (1)$$

式中: v_6 为既有引桥6#桥墩振动速度峰值(Z 方向); x_6 为打桩距离; l_6 为贯入深度。

根据分析结果可知,打桩距离和贯入深度对既有引桥的振动速度有显著影响。打桩距离的回归系数为-0.635,表明随着打桩点与引桥之间距离的增大,振动速度显著降低,其 t 值为-14.965,具有高度统计显著性;贯入深度的回归系数为0.568,表示贯入深度增大时振动速度显著提升,其 t 值为13.377,同样具有高度统计显著性。模型的 F 值为73.116,调整后的 R^2 为0.913,表明模型能解释91.3%的振动速度变异,拟合度极高。容差和方差膨胀系数显示无多重共线性问题,杜宾-沃森指数为1.956,接近2,表明残差间无显著自相关性。

然后分析3根工程桩对既有引桥3#桥墩的影响。在打桩过程中既有引桥3#桥墩的振动速度峰值与3根工程桩打桩距离和贯入深度的关系如图12所示。同样建立多元线性回归模型,分析结果见表4。

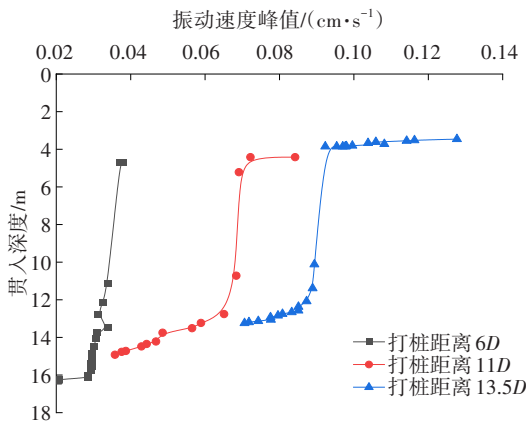


图12 既有引桥3#桥墩振动速度峰值与打桩距离、贯入深度的关系

Fig. 12 Relationship between the peak vibration velocity of pier 3# of the existing approach bridge and the driving distance and penetration depth of three engineering piles

根据表4中的回归系数可得既有引桥3#桥墩振动速度峰值(Z 方向)与打桩距离、贯入深度的关系式为:

$$v_3 = 0.678x_3 - 0.422l_3 \quad (2)$$

式中: v_3 为既有引桥3#桥墩振动速度峰值(Z 方向); x_3 为打桩距离; l_3 为贯入深度。

表4 既有引桥3#桥墩多元线性回归分析结果

Table 4 Results of multiple linear regression analysis of pier 3# of the existing approach bridge

项目	回归系数	t	显著性	容差	方差膨胀系数
常量		3.824	<0.01		
打桩距离	0.678	15.215	<0.01	0.765	1.308
贯入深度	-0.422	-9.469	<0.01	0.765	1.308
F 值	101.433				
调整后的 R^2	0.913				
杜宾-沃森指数	2.135				

根据分析结果,打桩距离的回归系数为0.678,表明随着打桩距离的增加,振动速度显著上升,其 t 值为15.215,显著性水平小于0.01,说明这一正相关关系在统计上是极其显著的。而贯入深度的系数为-0.422,意味着贯入深度的增加会导致振动速度的下降, t 值为-9.469,同样具有非常高的统计显著性。模型的 F 值为101.433,表明自变量整体上对因变量有极强的解释能力。调整后的 R^2 值为0.913,说明模型能够解释振动速度91.3%的变异,拟合度极高。容差和方差膨胀系数均在合理范围内,表明无多重共线性问题。杜宾-沃森指数为2.135,接近2,表明模型残差之间没有显著的自相关性。综上所述可知,打桩距离和贯入深度是显著影响既有引桥振动速度的关键因素,其中打桩距离的影响更为显著,所建模型可以可靠预测锤击沉桩对既有引桥振动速度的影响。

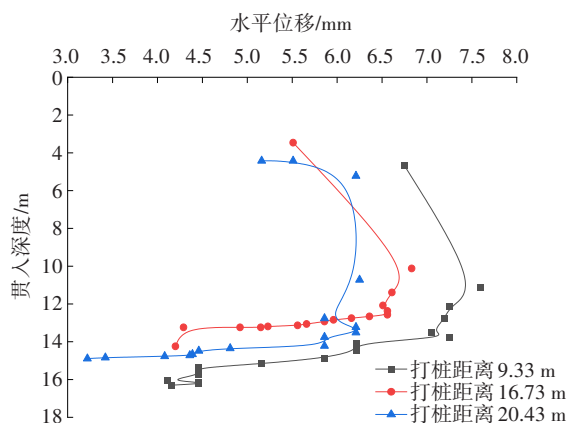
从图11~12可以看出,既有引桥上距离打桩较近的位置受打桩影响较大。在打桩过程中,既有引桥6#桥墩的振动速度峰值随着沉贯点距既有引桥距离的增加而降低,随着贯入深度的增加而增大,这是因为振动波能量随着传播距离的增加而衰减,且桩的锤击能量直接传递到了周围土体和结构中。贯入深度增加时,桩锤必须克服更大的土体阻力来传递能量,因此桩顶及其附近区域土体的振动速度明显较大。应力波沿桩身传播,并在土体与桩底、桩侧之间的界面发生反射和透射,尤其在桩身较长和贯入深度较大时,这些应力波的多次反射和叠加效应显著增强了桩顶及其附近区域土体的振动。同时,桩底对土体冲击所产生的向上传播的反射波与向下传播的入射波叠加,进一步增大了桩顶附近土体的振动速度。而既有引桥3#桥墩处的振动速度峰值随着打桩距离的增加而增大,随着贯入深度

的增加而减小,这可能是因为远场振动波以面波的形式传播,距离增加时散射波叠加使振动速度增大。而当贯入深度增加时,桩底冲击土体产生的高频振动在土体中易被吸收耗散,同时使桩周土体结构紧密化,增强了对振动波传播的阻碍,减少了振动波的能量传递。

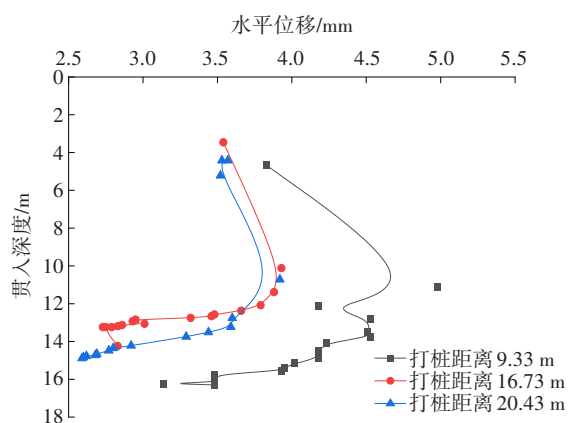
4.2 既有引桥水平位移分析

打桩过程中既有引桥6#和3#桥墩顺桥、横桥方向水平位移与3根工程桩打桩距离和贯入深度的关系如图13~14所示。其中,顺桥方向是指沿着既有引桥的方向,横桥方向是指垂直于引桥的方向。

由图13~14可知,既有引桥3#和6#桥墩的顺桥和横桥方向的水平位移基本上随着打桩距离的增加而减小,而且横桥方向的水平位移均比顺桥方向的小。由于6#桥墩距打桩位置较近,桩基施工引



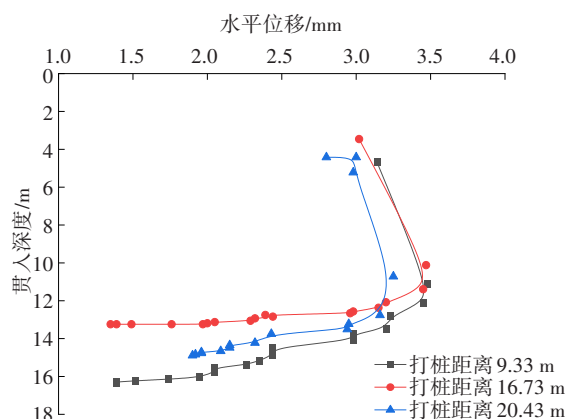
(a) 既有引桥6#桥墩顺桥方向水平位移



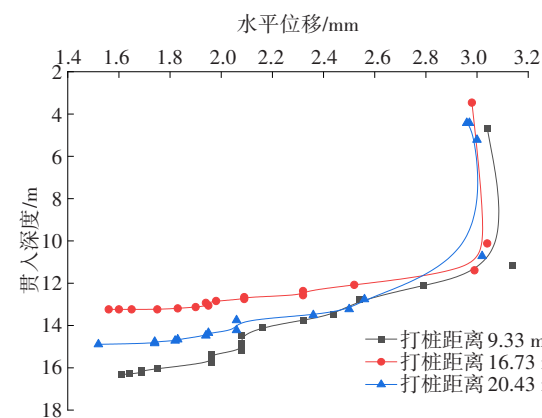
(b) 既有引桥6#桥墩横桥方向水平位移

图13 既有引桥6#桥墩水平位移与工程桩打桩距离、贯入深度关系

Fig. 13 Relationship between horizontal displacement of pier 6# of existing approach bridge and pile driving distance and penetration depth of three engineering piles



(a) 既有引桥3#桥墩顺桥方向水平位移



(b) 既有引桥3#桥墩横桥方向水平位移

图14 既有引桥3#桥墩水平位移与工程桩打桩距离、贯入深度的关系

Fig. 14 Relationship between horizontal displacement of pier 3# of the existing approach bridge and driving distance and penetration depth of three engineering piles

起的土层扰动和应力波传播对其影响较大,因此6#桥墩水平位移的变化较3#桥墩更加显著。各打桩距离下水平位移与贯入深度之间关系的变化规律基本一致,呈先增大后减小的趋势,在入岩时出现峰值。这是由于桩刚开始入岩时,桩端阻力急剧增加,桩身振动加大。在这个阶段,桩端受到的阻力突然增大,桩身传递给土层的振动和应力波增强,导致既有引桥的水平位移达到了峰值。随着桩的继续贯入,桩端阻力持续存在,但贯入速度减慢。在这一阶段,既有引桥距离沉贯点较近的位置继续保持较大的水平位移,而较远位置的水平位移相对较小。当桩完全嵌入岩石,贯入深度基本上不再增加时,既有引桥距离沉贯点较近位置的水平位移持续减小,而较远位置的水平位移已经很小,且在进一步减小。这是因为当桩体嵌入坚硬岩石后,桩体获得了极高的稳定性和承载力,有效限制了桩体在锤击作用下进一步的水平移动。同时,随着桩体贯

入深度的稳定,桩周土体中的应力积累达到极限并开始逐渐释放,减小了对周围环境的挤压效应。此外,桩土相互作用趋于稳定,能量传递减少,对相邻结构物的影响也有所降低。

5 讨论

本文将现场实时监测技术与多元线性回归分析相结合,为既有引桥在打桩过程中的动态响应提供了定量化的研究方法。传统研究往往只关注单一因素对结构响应的影响,忽视了多因素交互作用的复杂性。相较于传统方法,本文能更准确地捕捉锤击沉桩过程对既有结构的影响。传统方法往往依赖于定性分析或经验判断,而本文通过实证数据,利用多元线性回归模型,量化了多个影响因素对一个响应变量的影响程度,定量分析了打桩距离和贯入深度对振动速度峰值的影响,提高了数据处理的准确性和可靠性。

在现场监测过程中, X 、 Y 和 Z 三个方向中主频峰值为98 Hz。文献[21]规定既有引桥基础的容许振动速度峰值为15 mm/s。本文的监测结果显示,实际振动速度峰值低于此容许值,因此在打桩过程中,桥面结构所承受的动载荷处于安全范围内。根据试验现场矿石码头工程的设计说明,既有引桥的容许水平位移阈值为8 mm,实际观测到的最大位移为7 mm左右,低于工程设计的最大容许值。因此在当前的位移水平下,结构的安全性未受损害,仍处于安全服役状态。

同时,本文对振动波在土体和结构中传播与衰减机制的分析,为打桩作业对周围环境的影响提供了原理性见解;对水平位移变化机理的探讨揭示了土层扰动和应力波传播对结构响应的影响,这一机理具有广泛的适用性。

6 结论

1) 通过分析同一打桩点对既有引桥不同位置结构的影响后发现,在打桩过程中既有引桥竖直方向的振动及顺桥方向的水平位移更为显著,尤其是邻近振源的桥墩受锤击力的影响更大,振动响应更明显。振动波在土体中传播时受到硬质土层和高阻尼特性土体的限制,其衰减程度受土体惯性及与振源之间距离大小的影响,导致桥墩间的振动响应

存在差异。

2) 以振动速度为研究对象,采用多元线性回归分析的方法分析打桩距离和桩身贯入深度两大关键因素对既有引桥的影响。根据回归分析结果可知,既有引桥6#桥墩的振动速度峰值随着打桩距离的增大而减小,随着贯入深度的增大而增大;而既有引桥3#桥墩的振动速度峰值随着打桩距离的增大而增大,随着贯入深度的增大而减小。

3) 分析既有引桥水平位移与打桩距离和贯入深度的关系可知,在打桩过程中,既有引桥的水平位移随着打桩距离的增加而减小,横桥方向的水平位移比顺桥方向的小,靠近振源的桥墩的水平位移因土层扰动和应力波传播而更为显著。水平位移随着贯入深度的增加先增大后减小,在桩体入岩时达到峰值,且桩端阻力激增致使振动增强。随后随着桩体完全嵌入岩体,应力逐渐被释放,水平位移持续减小,由此揭示了土层与结构相互作用的复杂性。

4) 现场监测显示,既有引桥的实际振动速度峰值低于规范规定的15 mm/s,表明打桩作业中桥面结构的动载荷是安全的。同时,引桥的最大位移为7 mm左右,小于设计规定的8 mm容许阈值,结构安全性未受损,处于安全服役状态。

参考文献(References):

- [1] GE Y F, LIU J, ZHANG X, et al. Automated detection and characterization of cracks on concrete using laser scanning[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2023, 29(2): 04023005. DOI: 10.1061/jitse4.iseng-1936.
- [2] 董军锋, 张旻, 雷波. 打桩振动对相邻建筑影响的测试与分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(3): 397-401. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2015-03-021. DONG Junfeng, ZHANG Min, LEI Bo. Test and analysis of influence of vibration due to pile driving on adjacent building [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(3): 397-401. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2015-03-021.
- [3] 徐莉. 锤击沉桩施工对土层孔隙水压力影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(6): 76-78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4637.2014.06.021. XU Li. Experimental study on the influence of hammer sinking pile construction on soil pore water pressure [J]. China Concrete and Cement Products, 2014(6): 76-78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4637.2014.06.021.
- [4] LUKPANOV R, TSIGULYOV D, YENKEBAYEV S, et al. Vibration monitoring as a method for assessing the pile driving-induced impact in restrained urban conditions

- [J]. E3S Web of Conferences, 2023, 371: 02028. DOI: 10.1051/e3_sconf/202337102028.
- [5] MACHAČEK J, STAUBACH P, TAFILI M, et al. Investigation of three sophisticated constitutive soil models: from numerical formulations to element tests and the analysis of vibratory pile driving tests [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 138: 104276. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104276.
- [6] SOFISTE T V, GODINHO L, COSTA P A, et al. Numerical modelling for prediction of ground-borne vibrations induced by pile driving [J]. Engineering Structures, 2021, 242: 112533. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112533.
- [7] STAUBACH P, MACHAČEK J, SKOWRONEK J, et al. Vibratory pile driving in water-saturated sand: back-analysis of model tests using a hydro-mechanically coupled CEL method [J]. Soils and Foundations, 2021, 61(1): 144-159. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.11.005.
- [8] 李怡闻, 周健. 土-结构动力相互作用分析打桩引起相邻隧道振动[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 60-65. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2007.01.009.
- LI Yiwen, ZHOU Jian. Analysis of tunnel vibration due to pile driving under soil-structure dynamic interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 60-65. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2007.01.009.
- [9] 苏栋, 吴泽雄, 雷国平, 等. 打桩施工对既有隧道及地表振动的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊2): 868-877.
- SU Dong, WU Zexiong, LEI Guoping, et al. Impact of pile driving on the vibrations of existing tunnels and ground surface [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(sup 2): 868-877.
- [10] 徐通. 打桩施工振动对周边建筑物影响的三维数值分析[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(12): 51-54, 99. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2021.12.013.
- XU Tong. Three-dimensional numerical analysis of vibration effect of piling construction on surrounding buildings [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 28(12): 51-54, 99. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2021.12.013.
- [11] NOORI H S, SHIRINABADI R, MOOSAVI E, et al. Effect of pile driving on ground vibration in clay soil: numerical and experimental study [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(4): 2051-2062. DOI: 10.1007/s10706-021-02010-8.
- [12] SUN Z Z, YU H F, LI C F, et al. Ground and pile vibrations induced by pile driving [J]. Buildings, 2023, 13(8): 1884. DOI: 10.3390/buildings13081884.
- [13] 李文静. 某桥梁桩基础施工对既有隧道的影响[J]. 中国新技术新产品, 2023(1): 103-105. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2023.01.032.
- LI Wenjing. The impact of the construction of pile foundation of a certain bridge on the existing tunnel [J]. New Technology & New Products of China, 2023(1): 103-105. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2023.01.032.
- [14] 慕建刚, 徐建. 桥梁桩基础施工对既有给水管线的安全影响分析[J]. 浙江建筑, 2023, 40(5): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1008-3707.2023.05.013.
- MU Jiangang, XU Jian. Analysis of safety impact of bridge pile foundation construction on existing water supply pipeline [J]. Zhejiang Construction, 2023, 40(5): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1008-3707.2023.05.013.
- [15] 章维明. 桥梁桩基础施工对既有明挖隧道变形影响研究[J]. 公路工程, 2020, 45(2): 143-146, 167. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.02.025.
- ZHANG Weiming. Study on influence of bridge pile foundation construction on deformation of existing open tunnels [J]. Highway Engineering, 2020, 45(2): 143-146, 167. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.02.025.
- [16] XU R Q, GUO Z, DING P, et al. Overview on influence of vibration induced by shield construction on adjacent buildings and its control measures [J]. Tunnel Construction, 41 (sup 2): 14-21. DOI: 10.3390/buildings14093024.
- [17] WANG S G, ZHU Z M, ZHU S Y. Monitoring and assessment of vibration impact on ultraprecision equipment in a hospital throughout a whole construction period [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023, 37(3): 04023021. DOI: 10.1061/jpcferv.cfeng-4268.
- [18] 李强. 新型空沟隔振性能研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020. DOI: 10.27147/d.cnki.ghdju.2020.000535.
- LI Qiang. Research on the vibration isolation performance of a new type of trench [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020. DOI: 10.27147/d.cnki.ghdju.2020.000535.
- [19] SERDAROGLU M S. Nonlinear analysis of pile driving and ground vibrations in saturated cohesive soils using the finite element method [D]. Iowa City: The University of Iowa, 2010: 2-4. DOI: 10.17077/etd.rtrwht6t6.
- [20] HU Y, RANDOLPH M F. A practical numerical approach for large deformation problems in soil [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, 22(5): 327-350. DOI: 10.1002/(sici)1096-9853(199805)22:5<327::aid-nag920>3.0.co;2-x.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for allowable vibration of building engineering: GB 50868—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

(责任编辑:石月珍)