

复合断面隧道受侧方沉桩影响的模型试验研究

吴长官, 刘俊伟*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 打桩施工产生的冲击荷载和挤土效应可通过地层传递到隧道结构, 需进行控制和监测来保证地铁隧道的正常运营。基于青岛地区的地层工况, 采用室内模型试验研究复合断面隧道受旁侧沉桩施工的影响。试验中考虑了单桩、群桩、沉桩深度与桩隧间距等因素, 研究沉桩对既有隧道附加弯矩和振动效应的影响。结果表明: 随着桩隧间距的增大, 隧道的附加弯矩逐渐减小, 附加弯矩的分布形态基本呈现出了隧道顶部和底部远离中心点位、左右两端靠近中心点位的趋势。当沉桩深度超过某一定值时, 沉桩深度和桩隧间距对隧道振速有明显的影响。模型试验揭示了复合地层中沉桩施工对临近既有隧道的受力变形和动力响应规律, 研究成果可为类似工况下隧道监测提供参考。

关键词: 隧道; 沉桩; 模型试验; 附加弯矩; 振速

中图分类号: TU455

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)05-0033-10

Model test study on the composite section tunnel influenced by lateral pile driving

WU Changguan, LIU Junwei*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The impact load and earth squeezing effect generated by piling construction can be transferred to the tunnel structure through the stratum, which needs to be controlled and monitored to ensure the normal operation of subway tunnel. Based on the stratum condition in Qingdao area, laboratory model test was conducted to study the influence of lateral pile driving construction on the composite section tunnel. In the test, factors such as single pile, group piles, the depth of pile driving and the distance between piles and tunnel are considered to study the influence of pile driving on the additional bending moment and vibration effect of existing tunnel. The results show that with the increase of the distance between piles and tunnel, the additional bending moment decreases gradually. The distribution pattern of the additional bending moment basically shows that the top and bottom of the tunnel are far away from the center point, and the left and right ends of the tunnel are close to the center point. When the depth of pile driving exceeds a certain value, the depth of pile driving and the distance between piles and tunnel have obvious influence on the tunnel vibration ve-

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 山东省泰山学者工程专项经费资助项目 (tsqn202211176)

作者简介: 吴长官 (1998—), 男, 山东菏泽人。硕士, 研究方向为岩土工程。E-mail: 978631453@qq.com。

* 通信作者: 刘俊伟 (1983—), 男, 山东青州人。博士, 教授, 博导, 主要从事滨海岩土工程、地铁隧道工程等方面的研究。
E-mail: liujunwei@qut.edu.cn。

locity. The stress deformation and dynamic response of pile driving construction to adjacent existing tunnel in composite stratum are revealed. The research results can provide a certain reference for tunnel monitoring under similar working conditions.

Key words: tunnel; pile driving; model test; additional bending moment; vibration velocity

在高度拥挤的城市中,伴随着城市现代化的发展和日益增长的地铁里程,城市中心建设开发也如火如荼,地铁所处的城市黄金地段也多受开发商青睐。桩基础因为其承载力较高,是高层建筑和城市立交桥广泛采用的一种基础形式。桩在打入施工过程中,会产生挤土效应,土体会进一步位移,从而引起临近隧道结构的变形。打入桩施工中若是采用重锤锤击桩体,锤击过程产生的冲击能量会导致隧道振动,也会造成轨旁设备脱落侵限等,需要对临近桩基工程进行控制和监测来保证轨道交通的正常运营。实际工程中隧道受到桩基影响的情况屡见不鲜。WARD^[1-2]对伦敦地区近接挤土桩工程中的隧道进行了监测,发现挤土桩施工会对隧道位移及变形产生影响。徐而进等^[3]采用理论解析和有限元模拟相结合的方法,通过对临近地铁线路的上海浦东新区“世纪大都会”工程进行计算,发现桩基沉降引起既有地铁隧道沉降的最大值为 3.571 mm。何奇威^[4]对杭州市某工程中的隧道进行监测,发现在浇筑混凝土时,隧道结构单日最大变形量达到 0.3 mm,已超过预警值。

针对沉桩过程对临近隧道的影响,许多学者进行了研究分析。李富荣等^[5]基于 3×3 群桩,设计完成了沉桩挤土效应对临近地下管线应变影响的模型试验研究。李怡闻等^[6]为研究软土地区预制混凝土桩打桩过程,采用 ANSYS 有限元软件分析不同打桩间距、沉桩深度、打桩能量对临近隧道的振动影响。CHUNG^[7]分别对挤土桩与非挤土桩进行了土工离心模型试验来研究单桩对临近砂土隧道的影响,试验表明打入桩的施工对临近既有隧道的影响更大,隧道肩部的弯矩将增大 1 倍,如果在隧道正上部进行打桩,隧道顶部弯矩值将增大 400%。靳军伟等^[8]采用理论分析的方法得到了两种桩基施工下既有隧道位移及截面的内力分布计算公式。钟颜开^[9]分析了实际监测数据,为减少软土地区静压桩施工对隧道位移的影响,提出了改变施工工艺、调整静压桩施工顺序及设置泄压井等保护措施。

目前关于桩-土-隧道三者相互影响的问题,研究多是针对隧道施工对临近既有桩基的影响,对桩基施工对既有隧道的影响研究还是十分缺乏。国内外研究人员针对静压和振动沉桩方式下的挤土效应研究较多,但有着更加明显挤土效应和振动扰动的锤击沉桩过程研究较少,并且多是只考虑了挤土效应对隧道的影响,忽略了打桩振动产生的应力波扰动对隧道的影响。实际工程项目中缺乏此类工况的研究成果指导,因此开展锤击沉桩对临近隧道影响规律的研究具有十分重要的工程意义。

基于青岛地区实际的地质条件和工程背景,采用模型试验相似理论设计开展了青岛典型上软下硬复合地层工况下近距离桩基施工对既有隧道影响的室内模型试验,以研究复合地层中动力沉桩过程对既有隧道的响应规律。

1 模型试验方案

1.1 依托工程概况

试验地层结构依托青岛某邻近运营地铁隧道的学校项目工程。桩基桩端持力层为强风化岩岩层,场地地层分布范围内桩身穿越地层主要为:杂填土、粉质黏土、全风化花岗岩,如图 1 所示。实际工程中钢筋混凝土预制桩的长度为 6.7~12.5 m,桩径尺寸 $d_p=0.6$ m,桩端为闭口且带桩尖。

隧道断面为采用 TBM 施工的单洞单线圆型隧道,外直径 $D_p=6$ m,内直径 5.4 m,衬砌采用的是抗渗级别 P10 的 C45 混凝土,厚度 0.3 m,隧道主体位于全风化—强风化花岗岩岩层中,主要影响区域内隧道拱顶最浅埋深 $h_p=9$ m。沉桩对隧道的影响与沉桩深度和桩隧间距有着直接的关系,故原型工况中考虑桩轴与隧道距离 L_p 的范围为 3~15 m ($0.5D_p\sim 2.5D_p$),沉桩深度 H_p 范围为 0~15 m ($0D_p\sim 2.5D_p$),沉桩深度为完整桩身贯入土层的竖向距离。本次分析工况是忽略桩尖情况下的工况条件,桩基与隧道的相对位置关系见图 1。

1.2 相似关系

本次试验确定的几何相似比 $C_L = 1 : 30$ 。根据平衡方程、几何方程、物理方程、边界条件、初始条件和时间条件可确定本次模型试验各物理量的量纲和相似系数^[10],如表 1 所示。

根据原型地层的各物理力学参数,结合前文介绍的模型试验各物理量的相似比,可得到原型与模型各地层的各物理力学参数如表 2 所示。

土质相似材料(模型全风化软岩及模型强风化硬岩)选取重晶石粉、砂为骨料,用于改变材料的重度;石膏、松香为胶结剂,主要调整材料的胶结性能;膨润土为添加剂。满足要求的原材料配比如表 3 所示。

岩质相似材料(模型中风化硬岩)选用砂、重晶石粉、石膏、松香和酒精为原材料。采用正交试验理论设计岩土相似材料配比试验,最终得到满足要求的原材料配比,如表 4 所示。

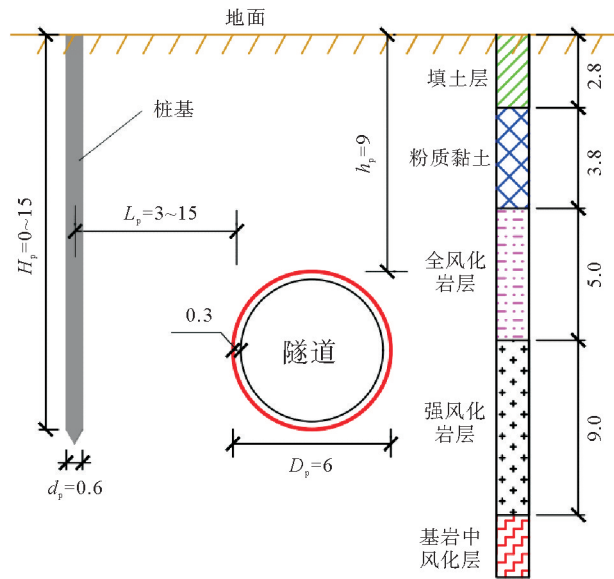


图 1 桩基与隧道相对位置关系(单位:m)

表 1 模型试验物理力学参数相似系数

类别	物理量	量纲	相似关系	比例
几何特性	几何尺寸 L	[L]	C_L	1 : 30
材料特性	密度 ρ	$[M \cdot L^{-3}]$	$C_\rho = 1$	1 : 1
	容重 γ	$[M \cdot T^{-2} \cdot L^{-2}]$	$C_\gamma = 1$	1 : 1
	内摩擦角 φ	1	$C_\varphi = 1$	1 : 1
	弹性模量 E	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	$C_E = C_L C_\rho C_g$	1 : 30
	泊松比 μ	1	C_μ	1 : 1
	黏聚力 c	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	$C_c = C_L C_\rho C_g$	1 : 30
动力特性	抗压强度 σ_c	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$	C_{σ_c}	1 : 30
	应变 ϵ	1	$C_\epsilon = 1$	1 : 1
	重力加速度 g	$[L \cdot T^{-2}]$	$C_g = 1$	1 : 1
	加速度 a	$[L \cdot T^{-2}]$	$C_a = C_g$	1 : 1
	速度 v	$[L \cdot T^{-1}]$	$C_v = C_L^{1/2} C_g^{1/2}$	1 : $\sqrt{30}$

表 2 原型和模型地层的物理力学参数

岩土层	重度 $\gamma /$ ($kN \cdot m^{-3}$)	弹性模量 E / MPa	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	单轴抗压强度 σ_c / MPa
原型全风化软岩	21	25.00	35.00	25	—
模型全风化软岩	21	0.83	1.17	25	—
原型强风化硬岩	22	40.00	150.00	35	—
模型强风化硬岩	22	1.33	5.00	35	—
原型中风化硬岩	23	1200.00	600.00	40	20.10
模型中风化硬岩	23	40.00	20.00	40	0.67

表3 土质相似材料最终配合比

类别	(砂+重晶石粉):(石膏+松香)	松香:石膏	重晶石粉/%	膨润土/%
模型全风化软岩	6:1	3:7	10	15
模型强风化硬岩	8:1	3:7	30	10

注:各相似原材料配合比均为质量比,试样保持砂的质量为500 g。

表4 岩质相似材料最终配合比

类别	重晶石粉质量:骨料质量	石膏质量:相似材料总质量	松香酒精溶液浓度
模型中风化硬岩	56.1%	4.6%	14.9%

注:试样保持骨料(重晶石粉+砂)的质量为1000 g,设置松香酒精溶液质量占相似材料总质量的7.5%。

本次试验采用有机玻璃圆筒来模拟原型隧道实体,以结构的抗弯刚度为主,不同于整体式结构,对于各向不连续的装配式隧道管片结构,如将其简化为连续的圆筒结构,需对盾构隧道的整体环向刚度 EI (EI 为均质管片的抗弯刚度)进行折减^[11],如图2所示。

在试验设计中将隧道视为薄板结构,仅考虑结构的弯曲变形,按照隧道结构弯曲变形的控制模式,采用弯曲变形相似准则来确定模型厚度^[13]。通过计算,隧道的相关参数见表5。

本次模型试验中并不需要对桩基的内力和变形进行分析考量,可将桩基视为刚性,故选择铝制材质试验桩。按照相似比确定桩长 $l_{\text{桩}} = 800 \text{ mm}$,桩径 $d = 20 \text{ mm}$,模型桩如图3所示。

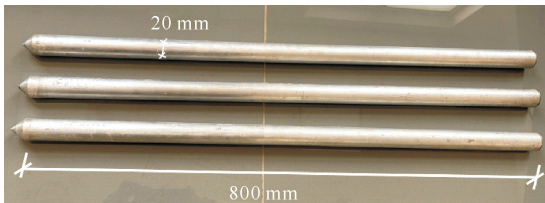


图3 模型试验桩

1.3 模型试验系统和试验方案

本次室内模型试验采用的模型箱尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,如图4所示。模型箱正面是20 mm厚的有机玻璃板。模型箱上方敞口,并焊接多个支撑杆。剩余三面均为5 mm厚钢板无缝焊接而成,同时焊有多个加劲肋。模型箱整体刚度满足试验及吊装要求。

本次试验选用课题组自主研发的锤击装置,用来模拟锤击沉桩过程。试验系统和锤击装置如图5所示,主要由下端导向板、导向杆、落锤转接头、50 kg落锤、240 kg电磁铁、锤击油缸活塞杆和锤击油缸缸筒构成。

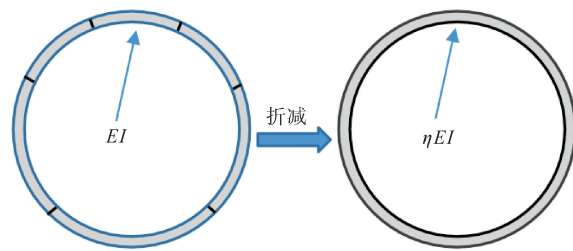
图2 隧道管片环向刚度折减^[12]

表5 原型与模型隧道相关参数

类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	外直径/mm	厚度/mm
原型隧道	33.5(25.1)	0.20	$D_p = 6000$	300
模型隧道	2.5	0.37	$D = 200$	4

注:括号中数据为折减后的等效刚度。



图4 试验模型箱

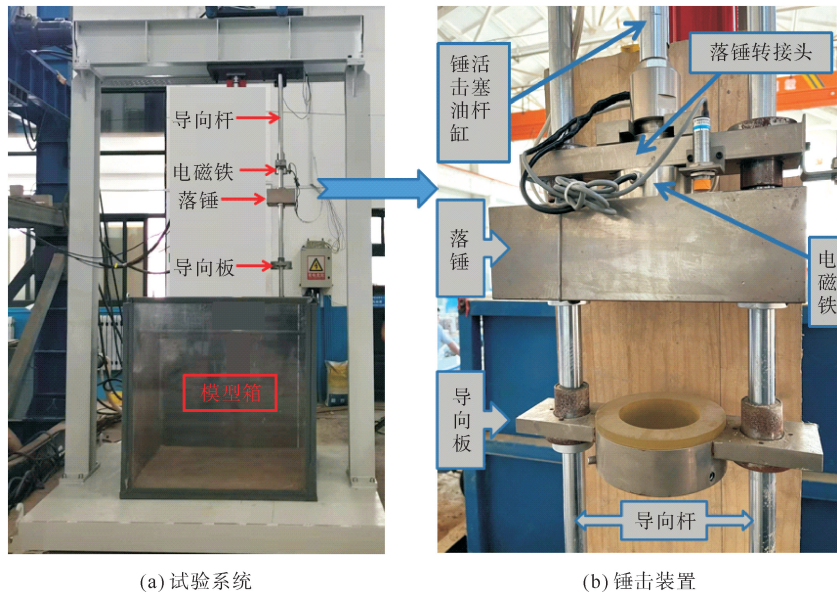


图 5 试验装置

根据相似原理及原型地层分布情况,试验中需要对原型地层分布进行一定的简化。考虑地层结构对隧道的最不利影响,将原型中的杂填土、粉质黏土和全风化岩层进行归一化处理,统一简化成 40 cm 全风化岩层,中部为 30 cm 的强风化岩层,基岩为中风化岩层。模型隧道外直径 $D=20$ cm,拱顶埋深 $h=30$ cm,对应原型隧道 9 m 的埋深,其上半部分处于全风化层中,下半部分处于强风化层中,隧道断面复合高度比是 1 : 1^[10],研究上软下硬土岩复合地层中沉桩施工对既有隧道的影响。模型试验方案如图 6 所示。

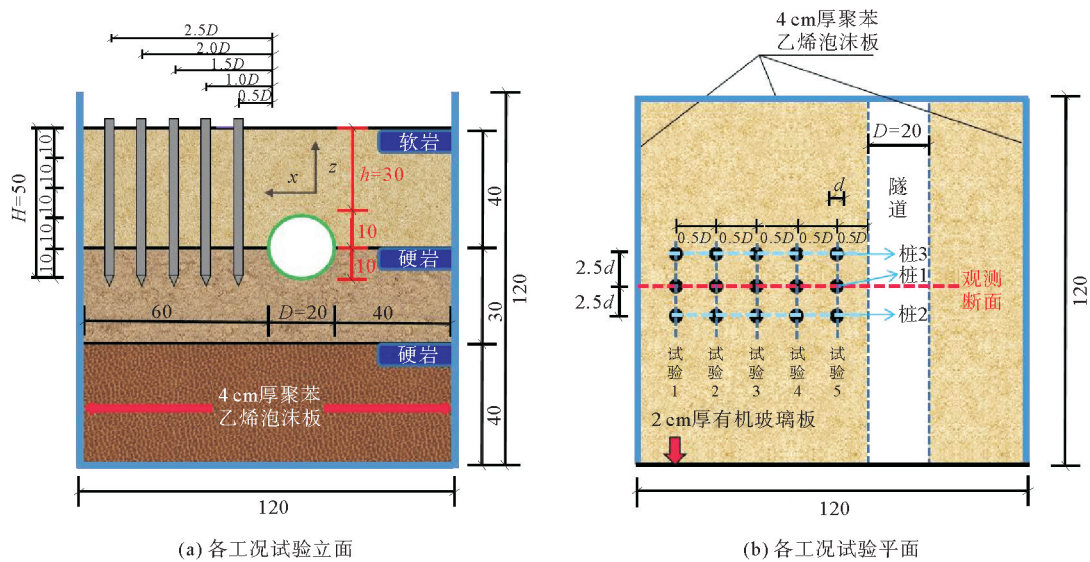


图 6 模型试验方案(单位:cm)

模型桩直径 $d=2$ cm,贯入深度 $H=0\sim 50$ cm,分别设置桩隧间距 $L=0.5D、1.0D、1.5D、2.0D、2.5D$ 共 5 个工况,每个工况中又同时设置单桩工况和群桩工况,其中群桩工况为 3 根桩,布置形式为直线型,桩间距为 $2.5d$,命名中间桩为桩 1,两边分别为桩 2 和桩 3。

1.4 数据监测及试验过程

试验中需要得到隧道受沉桩影响的弯矩及振速的变化规律,弯矩通过在隧道内外侧均匀布置应变片来测量,振速通过在隧道外布设加速度传感器进行测量。传感器的布设如图 7 所示。

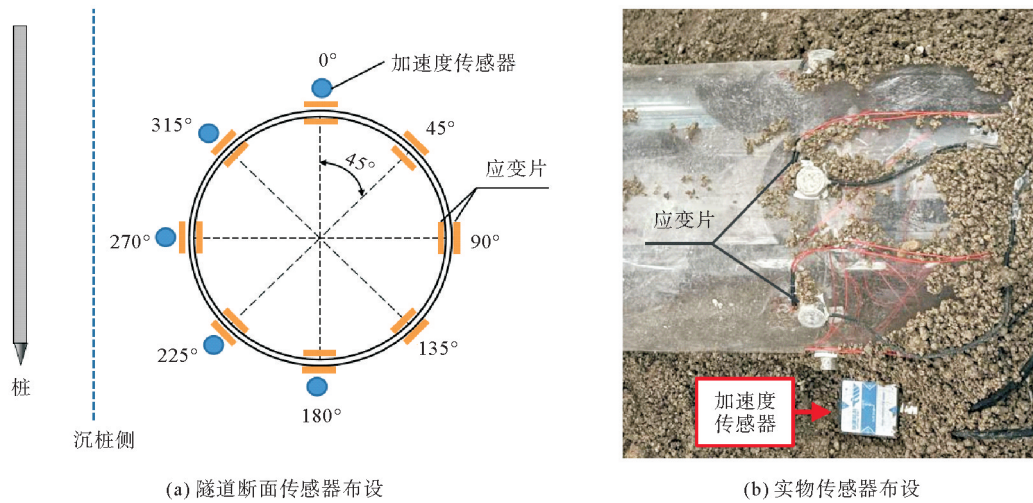


图7 隧道监测点位布置

试验过程如下:

- 1) 配备试验岩土体:根据前文得到的各岩土层相似原材料的配合比,分别计算出所需砂、重晶石粉、膨润土、石膏及松香酒精的质量,称量好后,倒入自落式搅拌机中搅拌均匀。
- 2) 岩土体铺设:铺设前首先在模型箱内放置好聚苯乙烯泡沫板,然后将搅拌均匀的材料倒入模型箱内,每铺设 100 cm 的高度人工均匀压实。
- 3) 模型隧道及传感器的安装:按照图 7 中隧道传感器的布置方案,对隧道结构处的传感器进行安装。当岩土体铺设达到既定高度时,在模型隧道及岩土层中放置相应传感器。而后回填剩余的岩土体,并夯实整平。
- 4) 数据采集系统调整:在电脑端调整好各传感器的采集要求,待传感器传输数据稳定后,取其数值作为初始状态的数据。模型静置 3 d 养护稳定。
- 5) 沉桩过程:提前打开采集设备,按照图 6 的试验方案,首先进行试验 1,即桩隧间距 $2.5D$ 的试验,试验中首先沉入桩 1,而后是桩 2 和桩 3,并以桩沉入 10 cm 为一个阶段,分别记录并命名各阶段的测量数据。试验 1 结束后,取出模型桩,挖出上两层软岩土体,按照上述试验步骤,依次进行试验 2—试验 5 的试验工况。

2 模型试验结果分析

2.1 隧道附加弯矩

本次隧道弯矩只考虑其受沉桩影响后弯矩值的变化规律,称之为隧道附加弯矩。隧道的附加弯矩是由于沉桩过程中桩基的挤土作用,进一步导致隧道周围地层发生应力重分布现象,隧道附加弯矩的变化可直接反映出隧道结构受沉桩影响的受力和变形情况。图 8 为试验中单桩工况、群桩工况下隧道各点位附加弯矩变化情况,图中正值(+)为隧道向外弯曲变化,负值(-)为隧道向内弯曲变化。

分析图 8 中变化规律可知,群桩工况下隧道附加弯矩的数值大小和变化速率要明显大于单桩工况下的隧道附加弯矩变化。2 个工况中均表现出的现象为:①在桩隧间距 $L \leq 1.5D$ 时,弯矩的变化趋势较陡,表示隧道附加弯矩变化受沉桩影响更明显。而在桩隧间距 $L > 1.5D$ 时,隧道附加弯矩基本为 0,受沉桩影响的变化也较为平缓。②8 个点位附加弯矩的绝对值均随着桩隧间距增大而减小,说明随着桩隧间距的增大,隧道的附加弯矩逐渐减小,且减小速率越来越小。③通过分析各点位附加弯矩在桩隧间距 $L = 0.5D$ 工况下相对于 $L = 2.5D$ 时的变化量,发现 2 个工况中 180° 点位(隧道拱底处)的附加弯矩变化量最大, 45° 点位处的附加弯矩变化量最小,与尹洪桦等^[14]分析不同桩隧间距情况下既有隧道的最大弯矩均出现在隧道沉桩侧的起拱线附近的结论一致。

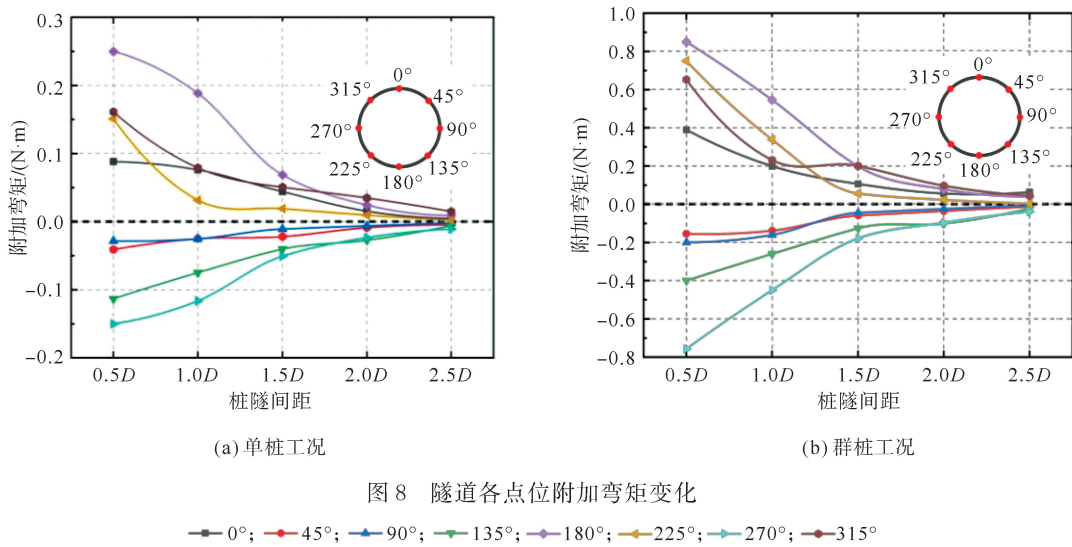


图 8 隧道各点位附加弯矩变化

图 9 分别为单、群桩工况下隧道附加弯矩的极坐标分布,可以明显地看出 2 个工况隧道附加弯矩的分布形态基本呈现出了隧道顶部和底部远离中心点位的趋势,而隧道结构的左右两端有靠近中心点位的趋势。随着沉桩过程中桩隧间距的减小,隧道结构的顶部和底部继续向外凸,而隧道结构的左右两端继续向内凹。这一现象与陈军等^[15]研究得到的静压桩施工挤土引起临近既有隧道的附加弯矩分布及隧道结构变形形态基本类似。结合试验中附加弯矩分布及相关文献的研究结果,可认为由于沉桩过程中的挤土应力,沉桩的力学作用范围变大,改变了隧道周围地层的应力平衡,进而导致隧道沉桩侧表现为受压,且因隧道刚度较大,非沉桩侧亦表现为受压,两侧拱腰处受压变形(135、270°),拱顶和拱底(180、225、315°)受拉变形,即隧道顶部和底部向外弯曲,隧道左右侧向内弯曲。

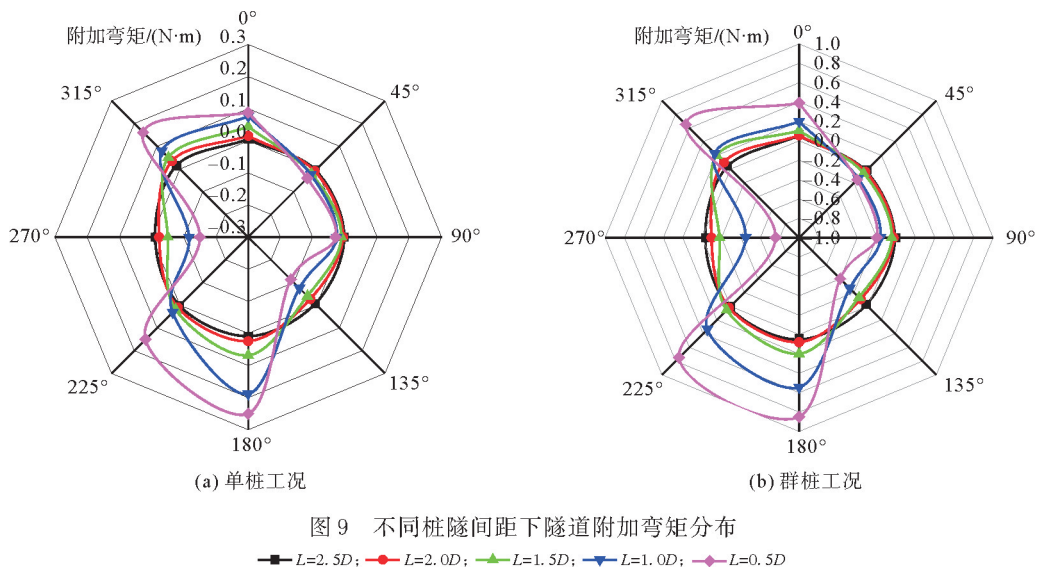


图 9 不同桩隧间距下隧道附加弯矩分布

2.2 隧道附加弯矩差值

将各桩隧间距下的隧道附加弯矩差值(群桩工况与单桩工况附加弯矩之差)绘制成图 10。

不同桩隧间距下的隧道附加弯矩最大差值基本出现在 180 和 270° 点位处,说明 180 和 270° 点位受沉桩数量影响最为敏感,并在桩隧间距 $L=0.5D$ 时分别达到最大差值 0.600 和 -0.607 $N \cdot m$ 。由分布形态可以看出,各点位附加弯矩差值随着桩隧间距的增大逐渐减小。在桩隧间距 $L=0.5D \sim 1.5D$ 时附加弯矩差值较大,且附加弯矩差值随着距离增大而减小的程度要明显大于桩隧间距 $L=2.0D \sim 2.5D$ 时的工况,可进一步说明桩隧间距 $L=0.5D \sim 1.5D$ 时,群桩施工对隧道附加弯矩的影响要更加明显,群桩效

应显著,而桩隧间距 $L \geq 2.0D$ 时,单桩和群桩工况差异并不大,群桩效应不显著。综合分析可知,群桩施工对隧道各点位附加弯矩的影响程度随着距离的增加有着明显的减小趋势。

2.3 隧道各点位振速峰值

沉桩深度 $H=0D \sim 0.5D$ 时,因沉桩深度较浅,隧道各点位振速峰值受沉桩深度与桩隧间距的影响不大,隧道振速总体分布情况与沉桩深度 $H=1.0D$ 时基本相似,故这里不再赘述,主要介绍沉桩深度 $H=1.0D \sim 2.5D$ 时隧道振速情况。将沉桩深度 $H=1.0D \sim 2.5D$ 时不同桩隧间距下隧道各点位最大振速数据绘制成隧道各点位振速峰值分布,如图 11 所示。

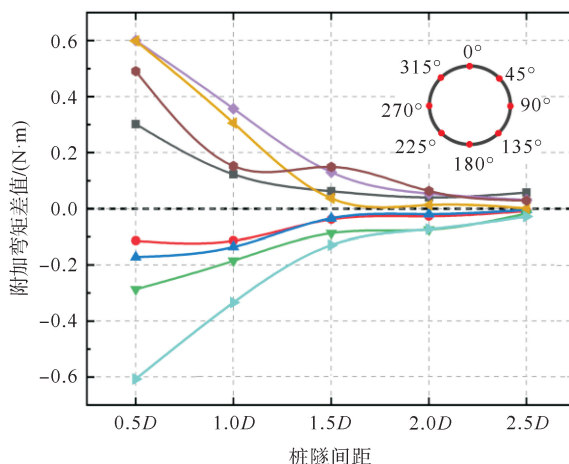
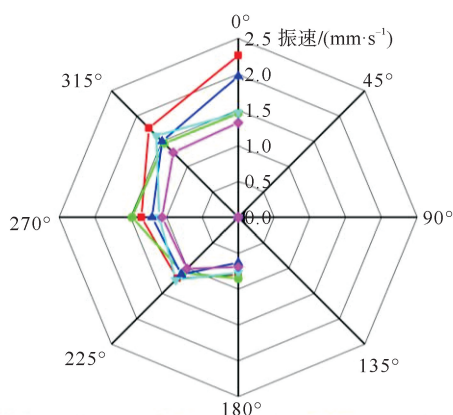
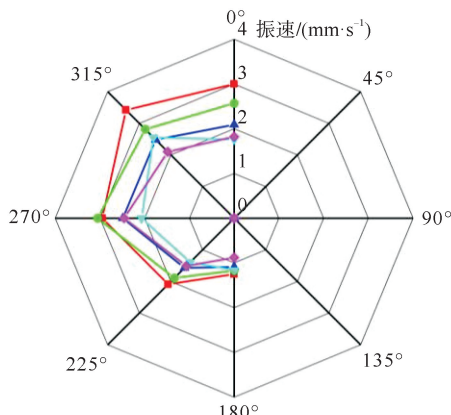


图 10 两工况附加弯矩差值

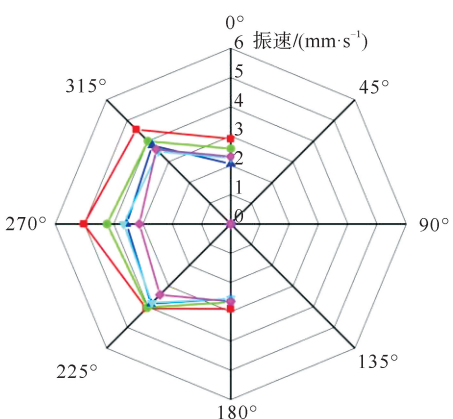
— 0°; — 45°; — 90°; — 135°;
— 180°; — 225°; — 270°; — 315°



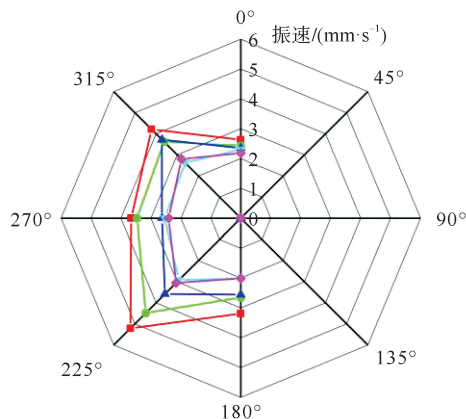
(a) 沉桩深度 $1.0D$ (桩底与隧道顶部距离 $0.5D$)



(b) 沉桩深度 $1.5D$ (桩底与隧道顶部深度相同)



(c) 沉桩深度 $2.0D$ (桩底与隧道中部深度相同)



(d) 沉桩深度 $2.5D$ (桩底与隧道底部深度相同)

图 11 隧道结构振速峰值

— $L=0.5D$; — $L=1.0D$; — $L=1.5D$; — $L=2.0D$; — $L=2.5D$

由图 11 可直观地看到隧道所受沉桩振动的影响与沉桩深度和桩隧间距有着直接关联,整体呈现出的趋势是隧道振速峰值随着桩隧间距的增加逐渐减小。当沉桩深度 $H=1.0D$ 时,隧道振速最大值 2.26 mm/s 出现在拱顶位置,隧道底部受沉桩影响最小。随着沉桩深度的增加,隧道所受最大振速的点位逐渐

沿着逆时针方向下移。在沉桩深度 $H=1.5D$ 时,桩底部与隧道顶部的高度一致,隧道结构的最大振速主要集中在左上 $1/4$ 区域,这一沉桩深度内最大振速出现在隧道 315° 点位处,最大值为 3.42 mm/s 。在沉桩深度 $H=2.0D$ 时,振速最大值 5.02 mm/s 出现在隧道 270° 点位处。当沉桩深度 $H=2.5D$ 时,最大振速出现在隧道的左下 $1/4$ 区域,最大值为 5.21 mm/s 。沉桩产生的振动是通过桩尖和桩侧以应力波形式向周围土体中传递和衰减的,所以应力波首先到达的是靠近震源处的隧道结构。隧道结构中振速峰值所在位置基本能反映出沉桩震源与隧道的相对方位。

2.4 隧道振速峰值变化

进一步绘制出隧道旁侧沉桩时,不同沉桩深度及桩隧间距等工况下隧道振速峰值的变化情况,如图 12 所示。

在沉桩深度 $H=0D\sim 1.0D$ 时,沉桩深度较浅,此范围内桩底距离隧道顶部的距离 $\geq 0.5D$,曲线较为平缓,且数值也相对较小,处于 $1.29\sim 2.26 \text{ mm/s}$,说明隧道振速峰值受沉桩深度与桩隧间距的影响不大。而当沉桩深度 $H>1.0D$ 时,沉桩深度 H 对隧道振速峰值的影响作用开始凸显,隧道受到的振动开始快速增加,在沉桩深度 $H=2.0D\sim 2.5D$ 时振速基本达到最大值。综合对比图 11 和图 12,发现在沉桩深度 $H\geq 2.0D$ 时(即桩底与隧道中部深度相同时),隧道各点位振速峰值随着桩隧间距增加,差异较为明显,呈现出明显的规律性变化。所以桩隧间距对隧道振速峰值的影响在沉桩深度 $H\geq 2.0D$ 时开始凸显,隧道振速峰值总体上呈现出随着桩隧间距增加而减小的规律。沉桩深度越深,应力波在地层中消耗的能量越小,传至隧道的相对范围就越大,隧道截面的振速就越大。以上现象与苏栋等^[16]得到的研究结论相吻合。

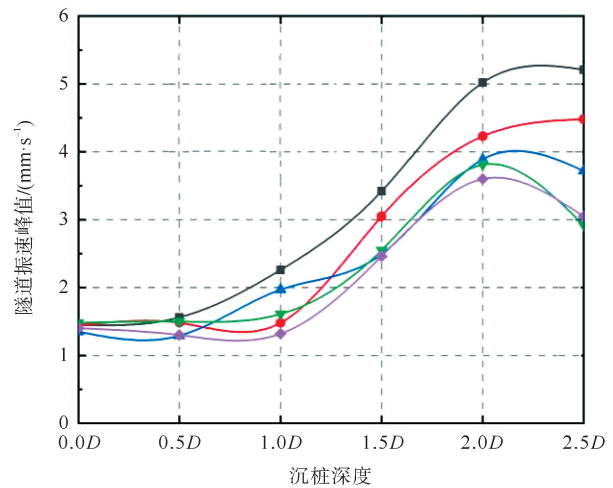


图 12 桩隧间距与沉桩深度对隧道振速峰值的影响
 —■— $L=0.5D$; —●— $L=1.0D$; —▲— $L=1.5D$; —▼— $L=2.0D$; —◆— $L=2.5D$

3 结论

通过室内模型试验,考虑沉桩深度 H 、桩隧间距 L 的影响,研究了沉桩对既有隧道的动力响应规律。得到以下结论:

- 1) 在桩隧间距 $L\leq 1.5D$ (D 为隧道外直径)时,隧道附加弯矩受沉桩影响更明显。随着桩隧间距的增大,隧道的附加弯矩逐渐减小。隧道附加弯矩与沉桩数量有着明显的关联。
- 2) 不同桩隧间距下的隧道附加弯矩最大差值基本出现在 180° 及 270° 点位处,群桩施工对隧道各点位附加弯矩的影响程度随着距离的增加有着明显的减小趋势。
- 3) 在沉桩深度 $H=0D\sim 1.0D$ 时,隧道振速峰值受沉桩深度和桩隧间距的影响不大。当沉桩深度 $H>1.0D$ 时,沉桩深度对隧道振速峰值的影响作用开始凸显。桩隧间距对隧道振速峰值的影响在沉桩深度 $H\geq 2.0D$ 时开始凸显。
- 4) 隧道结构振速峰值所在位置基本能反映出沉桩振动源与隧道的相对方位。实际工程中为保证隧道结构振动安全,应重点考虑在隧道靠近沉桩侧的拱腰区域布置振动监测设备。

参考文献 (References):

- [1] WARD W H. Displacements and strains in tunnels beneath a large excavation in London[C]// Proceeding of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Budapest: Soil and Rock Mechanics of the Hungarian Academy of Sciences, 1961: 749-753.
- [2] WARD W H. Discussion on use of sheet pile retaining walls for deep excavations in stiff clay[C]// Proceeding of Institution of Civil Engineers. London: Institution of Civil Engineers, 1991: 1265-1266.

- [3] 徐而进,陈伟,褚峰,等. 桩基沉降对紧邻地铁隧道的影响分析[J]. 结构工程师,2009,25(4):119-123.
XU Erjin, CHEN Wei, CHU Feng, et al. Analysis for the influence of pile foundation settlement on adjacent tunnels[J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 119-123.
- [4] 何奇威. 基桩施工对邻近盾构地铁隧道变形的影响研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2019.
HE Qiwei. Study on influence of foundation pile construction on deformation of adjacent shield tunnel[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [5] 李富荣,孙厚超,何山,等. 沉桩挤土效应对临近地下管线影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(3):487-491.
LI Furong, SUN Houchao, HE Shan, et al. Experimental study of soil compaction effect of pile on nearby underground pipelines[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(3): 487-491.
- [6] 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(1):60-65.
LI Yiwen, ZHOU Jian. Analysis of tunnel vibration due to pile driving under soil-structure dynamic interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(1): 60-65.
- [7] CHUNG K H. Effects of piles on tunnels[D]. London: University of Cambridge, 2007: 74-187.
- [8] 靳军伟,李咏梅,孟潮,等. 桩基础影响下既有地铁隧道截面内力计算研究[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(2):152-159.
JIN Junwei, LI Yongmei, MENG Chao, et al. Subway tunnel section inner force induced by pile foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 152-159.
- [9] 钟颜开. 静压桩施工对软土地层盾构隧道的影响分析及控制措施[J]. 广州建筑,2018,46(6):36-39.
ZHONG Yankai. Influence analysis of static pressure pile construction on shield tunnel in soft soil layer and its control measures[J]. Guangzhou Architecture, 2018, 46(6): 36-39.
- [10] 黄峰,刘俊杰,吴长官,等. 软硬复合断面隧道受侧方开挖卸荷的影响研究[J]. 青岛理工大学学报,2022,43(4):55-62.
HUANG Feng, LIU Junjie, WU Changguan, et al. Study on the influence of lateral excavation unloading on soft and hard composite section tunnel[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(4): 55-62.
- [11] 杨茜,罗玉屏,张振波,等. 地铁盾构隧道抗弯刚度有效率的模型试验研究[J]. 国防交通工程与技术,2020,18(4):39-42.
YANG Qian, LUO Yuping, ZHANG Zhenbo, et al. A model-tests-based study of the anti-bending effectiveness of the longitudinal and transverse rigidity of shield-drilled tunnels[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2020, 18(4): 39-42.
- [12] 俞涛. 地铁盾构隧道近接施工影响的数值模拟及模型试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2005.
YU Tao. Numerical simulation and model test for effects of close-spaced construction of subway shield tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [13] 曾理彬. 隔离桩控制基坑开挖对邻近隧道影响的模型试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2019.
ZENG Libin. Model test study on the influence of cut-off piles controlling foundation pit excavation on adjacent tunnel[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [14] 尹洪桦,尹洪冉,胡明华,等. 钢管桩施工对邻近既有隧道的动力响应分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2016,29(1):76-81.
YIN Honghua, YIN Hongran, HU Minghua, et al. Analysis of dynamic response of steel pipe piles construction on adjacent existing tunnel[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2016, 29(1): 76-81.
- [15] 陈军,杜守继,沈水龙,等. 静压桩挤土对既有隧道的影响及施工措施研究[J]. 土木工程学报,2011,44(S2):81-84.
CHEN Jun, DU Shouji, SHEN Shuilong, et al. Study on effect of jacked piles on tunnel and construction measures[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S2): 81-84.
- [16] 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(S2):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(S2): 868-877.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)