

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202002036

盾构隧道开挖对邻近桩基三维影响试验研究*

路德春, 丁超, 林庆涛, 杜修力

(北京工业大学岩土与地下工程研究所, 北京 100124)

摘要:参考清华园隧道盾构段全线近距离侧穿北京地铁13号线桩基的工程背景建立试验模型,开展卵石地层中盾构施工对邻近桩基三维扰动特征研究。试验模型中共布置5根模型桩(1#~5#桩)。以1#桩为例分析了盾构掘进过程对桩基的三维影响特征,发现附加弯矩主要产生在刀盘距桩基 $-0.5D$ 至 $0D$ 阶段,横向弯矩最大值是纵向弯矩最大值的2倍;附加轴力主要产生在 $-0.5D$ 至 $1.5D$ 阶段,桩顶附加沉降主要产生在 $-1D$ 至 $1D$ 阶段,桩端附加承载力在 $-0.5D$ 至 $2D$ 阶段持续增长。对比1#、2#和3#桩研究了桩-隧不同水平间距对桩基扰动规律的影响,发现桩基的附加沉降、附加弯矩和附加轴力均随与隧道水平距离的增大而减小,弯矩最大值的位置随着距离的增大而逐渐上移。对比1#、4#和5#桩分析了桩端相对竖向位置对桩基扰动规律的影响,得出桩端位于隧道拱顶的桩基的附加弯矩明显小于桩端位于中心线及拱底处桩基的附加弯矩。

关键词:盾构开挖;桩;模型试验;卵石地层;三维影响

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0732-10

Experimental Study on Three-dimensional Effects of Shield Tunnel Excavation on Adjacent Pile

LU Dechun, DING Chao, LIN Qingtao, DU Xiuli

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Taking the Qinghuayuan tunnel passing the piles of Beijing Metro Line 13 in a short distance as the engineering background, the three-dimensional disturbance characteristics of shield tunnel excavation in the pebble stratum to the adjacent piles is conducted by a model test. Five model piles (piles 1#~5#) were arranged in the test model. Taking pile 1# as an example, the influence of the excavation distance D on the three-dimensional disturbance law of the pile is studied. The test results indicate that the additional bending moment mainly occurs in the range of $-0.5D$ to $0.0D$; the maximum additional transverse bending moment is twice the maximum additional longitudinal bending moment; the additional axial force mainly occurs in the stage of $-0.5D$ to $1.5D$; the additional settlement on the pile top mainly occurs in the stage of $-1D$ to $1D$; and the additional load at the pile bottom continuously increases in the range of $-0.5D$ to $2.0D$. Test results of piles 1#, 2# and 3# show the influ-

* 收稿日期:2020-02-25;修回日期:2020-06-04

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(52025084)、国家自然科学基金项目(51421005,51538001)、中国博士后科学基金面上项目(2021M701934)资助

作者简介:路德春(1977—),男,教授,博导,博士。主要从事岩土力学与地下工程等方面的教学与研究。

E-mail: dechun@bjut.edu.cn

ence of the horizontal distance between the pile and the tunnel on the disturbance of the pile. It can be found that the additional settlement, additional bending moment and additional axial force of the pile decrease as the horizontal distance between the pile and the tunnel increases, but the position of maximum bending moment moves up. Test results of piles 1#, 4# and 5# present the impact of the position of the pile bottom on the disturbance rule of the pile. Comparing the bending moments of piles 1#, 4# and 5#, it can be seen that the additional bending moment of the pile whose bottom is located at the tunnel crown with the same depth is the smallest.

Keywords: shield excavation; pile; model test; pebble stratum; three-dimensional influence

引言

在城市地下轨道交通发展过程中,新建盾构隧道不可避免地穿越既有建筑物,从而带来隧道近距离穿越既有桩基的工程问题,例如深圳地铁一期工程7C标段与立交桥桩基邻接距离仅1.1 m^[1]、广州地铁二号线穿越框架结构式高层建筑桩基础^[2]、天津地铁3号线盾构隧道与铁东路立交桥桩基最小近距仅1.35 m^[3]等。C.H. Pang^[4]、沈建文^[5]通过现场监测发现隧道在穿越邻近桩基时会使桩基产生附加沉降和内力,进而可能影响桩基上部建筑物的安全与稳定。因此,研究盾构隧道开挖对邻近桩基础的影响具有重要意义。

众多学者利用模型试验方法研究了隧道开挖对邻近桩基的扰动规律。N. Loganathan等^[6]在硬黏土中针对不同埋深隧道开挖进行了桩长180 mm、隧道直径60 mm的离心机试验研究,试验结果表明,当桩基的桩端位于隧道中心线深度处或位于隧道中心线以下时,桩基会产生较大的附加弯矩和侧向位移,而当隧道中心线位于桩端下方时,桩基会产生较大的附加轴力;K.H. Chiang等^[7]发现在饱和砂土中桩与隧道的竖向位置关系是影响桩身弯矩分布的主要因素,并且当开挖造成的地层损失达到3%~3.5%时,桩身弯矩和轴力迅速增大;X. Ran^[8]通过一系列离心机试验,得出与隧道不同水平距离的桩基的附加弯矩沿桩身的分布规律基本相同,并随桩与隧道距离的增大呈指数递减;S.W. Jacobsz等^[9]通过离心机试验给出了密实干砂中隧道开挖使桩基产生较大沉降的区域。然而,上述有关隧道开挖对桩基影响的离心机试验研究均是模拟隧道在平面应变条件下的开挖,只能研究平面内土体开挖

对邻近桩基产生的二维影响,不能反映在隧道掘进过程中桩基所受影响的变化规律以及隧道开挖对桩基造成的不同方向的扰动^[10]。

为了研究隧道掘进过程中邻近桩基的受扰动特征,C.W.W. Ng等^[11-12]在离心机试验中将模型隧道按开挖方向分为五部分并分步进行开挖,发现在开挖面位于距桩基前0.25倍至桩基后1.25倍隧道直径范围内时,桩基的附加沉降明显增大;马少坤等^[13-14]同样采用分五步开挖的离心机试验方法研究了隧道开挖对群桩的影响规律,发现第二步开挖引起的前排桩的弯矩最大,后三步开挖引起桩的弯矩较小。分步开挖的离心机试验方法一定程度上揭示了隧道掘进对桩基的影响规律,但开挖过程并不连续,关于隧道开挖对桩基不同方向影响的试验研究也仍鲜有报道。

本文参考新京张铁路清华园隧道盾构段侧穿北京13号线桩基的工程案例,通过一定简化建立试验模型,利用自主研发的盾构机完成盾构隧道开挖,研究了随着盾构刀盘位置的变化邻近桩基受开挖影响的演化特征以及盾构开挖对桩基不同方向的扰动规律;并在试验模型中布置不同空间位置的桩基,分别对比研究了桩-隧不同水平距离以及不同桩端相对竖向位置对桩基扰动规律的影响。

1 工程背景

新京张铁路清华园隧道位于北京市海淀区,隧道进口位于学院南路北侧(DK14+090),出口位于双清路北侧(DK19+420),全长5 330 m。清华园隧道进口段(DK14+090~DK14+450)和出口段(DK14+450~DK18+200)采用明挖法施工,中段(DK14+450~DK18+200)长度为3 750 m,采用

直径 12.6 m 的泥水平衡盾构施工。清华园隧道全线与北京地铁 13 号线近距离并行,盾构施工时在知春路、大钟寺、五道口等十多处位置近距离穿越北京地铁 13 号线桥梁桩基。

图 1 统计了北京地铁 13 号线桩基的桩端与清华园盾构隧道的空间位置关系,图中显示新建清华园隧道与北京地铁 13 号线桩基的水平间距基本分布在 $0.5D \sim 2.0D$,多数桩基的桩端距清华园隧道中心线的竖向距离为 $-0.5D \sim 0.5D$,其中 D 为清华园隧道开挖直径,负值表示桩端在隧道中心上方,正值表示桩端在隧道中心下方。同时,盾构全程在卵石地层中掘进,砂卵石地层属于易扰动地层,盾构开挖极易引起地层的塌落破坏。因此,研究卵石地层中盾构施工对不同空间位置处桩基的扰动,有助于评价清华园隧道盾构开挖对北京地铁 13 号线安全运营的影响。本文采用模型试验的方法对上述问题进行了研究。

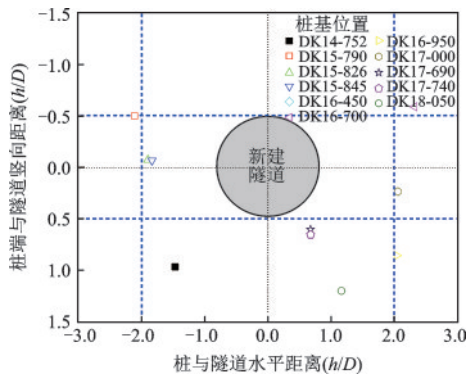


图 1 清华园盾构隧道与北京地铁 13 号线桩基相对位置统计
Fig. 1 The relative position statistics of Qinghuayuan shield tunnel and piles of Beijing metro line 13

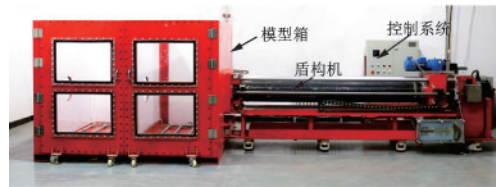
2 模型试验设计

参考清华园隧道盾构段工程案例,通过简化设计并建立了试验模型,采用自主研发的模型盾构机完成了试验模型中新建隧道开挖。

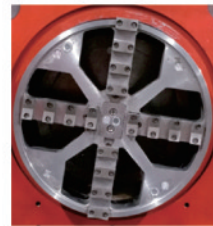
2.1 试验平台

试验平台由模型箱、模型盾构机和操作控制系统 3 个部分组成,如图 2(a)所示。模型箱内部尺寸为 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。模型盾构机为土压平衡式,包括开挖系统、顶进系统和出土系统,可模拟盾构动态掘进过程。开挖系统由刀盘

和驱动电机组成,刀盘为辐板式(图 2(b)),刀盘直径 0.28 m,开口率为 45%;刀盘最大扭矩为 $1\,800.0 \text{ N}\cdot\text{m}$,刀盘转速精度为 $0.1 \text{ r}/\text{min}$ 。推进系统由顶进丝杠和伺服电机组成,可提供 60.0 kN 的最大推力,盾构机顶进行程为 $2\,100.0 \text{ mm}$,出土系统由螺旋出土器及其驱动电机组成,螺旋出土器为轴式,最大可排除直径 10.0 mm 的土颗粒,驱动电机的最大扭矩为 $60.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。通过控制系统可实现模型盾构机顶进速度、刀盘转速和螺旋出土器转速的控制盾构机施工参数的实时记录。



(a) 模型盾构试验平台



(b) 盾构刀盘

图 2 模型盾构隧道开挖试验平台

Fig. 2 Model test platform for shield tunnel excavation

2.2 试验模型

模型盾构和清华园隧道盾构直径的比值为 $1:45$,因此按几何相似比 $1:45$ 设计了试验模型。试验模型尺寸为 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),新建隧道洞顶埋深为 0.62 m (根据实际工程 DK15-790 断面确定)。试验模型包含 5 根桩基(图 3),其中 1#、2#、3# 桩的桩端深度相同(隧道中心线处),距隧道边缘的水平距离分别为 0.14 m 、 0.28 m 和 0.56 m ,用于研究桩-隧间距不同时盾构开挖对桩基的扰动规律;1#、4# 和 5# 桩基和新建隧道的间距相同(0.14 m),桩端位置分别位于隧道中心线、拱底和拱顶处,用于研究桩端位置不同时盾构开挖对桩基的扰动规律。试验模型的建立主要包括相似卵石地层的配置与填筑、模型桩的设计制作和桩顶荷载的施加三部分工作,下文对上述内容进行了介绍。

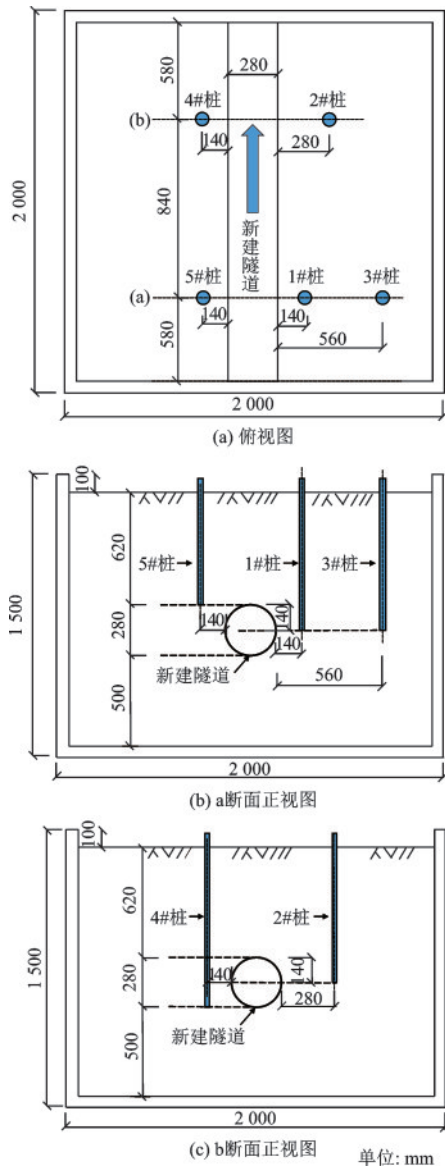


图3 试验模型示意

Fig. 3 Schematic diagram of test model

2.2.1 相似卵石地层

试验模型中将砂卵石复合地层简化为卵石地层。实际工程地勘报告中未提供卵石地层的力学参数,仅提供了不同粒径卵石颗粒的含量,因此试验中按几何相似比1:45对卵石粒径进行缩尺,得到了相似卵石地层。实际工程中卵石地层的颗粒组成为:直径为60~150 mm,20~60 mm和0~20 mm的卵石颗粒含量分别为约55%,15%和30%,见表1。按几何相似比1:45获得的模型试验卵石地层级配情况为:粒径1.3~3.3 mm占55%,0.44~1.3 mm占15%,0~0.44 mm占30%。为得到试验土体的目标级配,采用粗砂,细砂1和细砂2三种砂配置相似卵石地层,三种砂的级配如图4所示。

表1 卵石颗粒含量

Table 1 Pebble particle content

实际工程		试验配置	
卵石粒径/mm	含量/%	卵石粒径/mm	含量/%
60.0~150.0	55	1.0~3.0	60
20.0~60.0	15	0.5~1.0	10
0.0~20.0	30	0.0~0.5	30

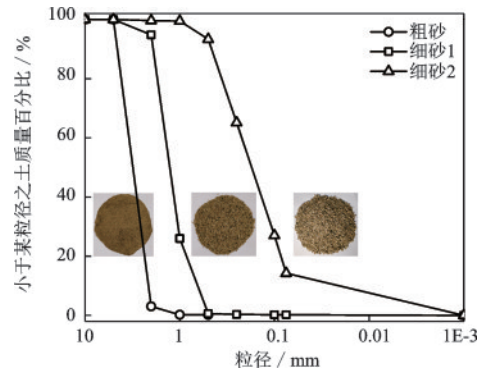


图4 试验用砂级配曲线

Fig. 4 Grading curve of test sand

实现目标配合比所需三种砂的质量比为:粗砂:细砂1:细砂2=1.129:1.097:1。相似卵石土配置完成后,通过筛分试验测试了其颗粒级配,级配曲线如图5所示,不均匀系数 $C_u=3.91 < 5$,曲率系数 $C_c=1.02 > 1$,级配连续。最终确定相似地层的目标颗粒级配为:粒径1~3 mm占60%,0.5~1 mm占10%,0~0.5 mm占30%(表1)。相似地层力学参数见表2。

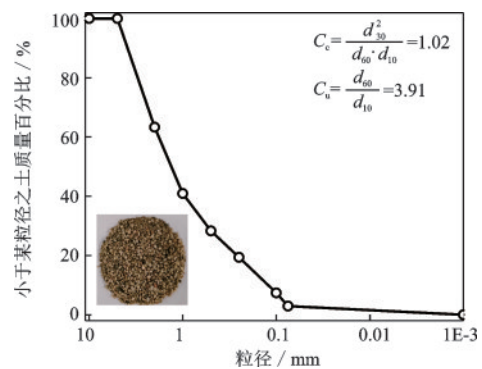


图5 混合砂级配曲线

Fig. 5 Grading curve of mixed sand

表2 相似地层参数

Table 2 Parameters of similar stratum

最大干密度 $\gamma_{d,max}$	孔隙比 e	峰值应力 比 M	λ	κ
2.04	0.464	1.2	0.042	0.011

2.2.2 模型桩

北京地铁13号线桩基为混凝土灌注桩,横截面多为圆形和矩形。矩形桩的截面尺寸为 1.0×2.5 m,抗弯刚度为 6.25×10^6 kN·m²。圆形桩的直径为1.0 m,抗弯刚度为 1.47×10^6 kN·m²。试验中采用圆形截面桩,根据相似理论模型桩的理想抗弯刚度应为:

$$E_m I_m = \frac{E_p I_p}{C_y 45^5} \quad (1)$$

式中, $E_m I_m$ 为模型桩的抗弯刚度; $E_p I_p$ 为原型桩的抗弯刚度; C_y 为密度的相似常数。

试验中选择LDPE(低密度聚乙烯)制作模型桩,其密度为 0.91 g/cm³,模型桩的理想抗弯刚度应为 2.89 N·m²,对应的模型桩的直径为 $18.3 \sim 21.7$ mm(弹性模量为 $266.0 \sim 525.0$ MPa)。该直径条件下,在桩身粘贴应变片较为困难,因此试验中采用直径 30 mm的LDPE棒材加工模型桩(图6),其抗弯刚度为 $10.57 \sim 20.87$ N·m²。



图6 模型桩
Fig. 6 Model pile

2.2.3 桩顶荷载

工程资料中未说明北京地铁13号线桩基所承受荷载值。根据《建筑桩基技术规范》^[15]中式(2)、(3)计算出了各模型桩所对应的单桩竖向承载能力特征值,本文以此作为模型桩基的顶部竖向荷载。

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \quad (2)$$

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (3)$$

式中, R_a 为单桩竖向承载力特征值; K 为安全系数, Q_{uk} 为单桩竖向承载力极限值, u 为桩身周长; q_{sik} 为极限侧阻力标准值; q_{pk} 为极限端阻力标准值; A_p 为桩截面面积。

为保证盾构开挖过程中桩顶荷载保持稳定,采用定制砝码的方法施加桩顶荷载。根据相似理论1#桩、4#桩、5#桩所加砝码重量分别为: 2.76 (2#、3#

桩与1#桩相同)、 3.13 、 2.34 kg。

2.3 监测方案

模型试验主要对盾构开挖过程中桩基的附加弯矩、附加轴力、附加沉降以及桩端承载力进行研究。为得到试验过程中模型桩的附加弯矩与附加轴力,自桩端开始在桩身四周每隔 100 mm布置应变片,模型桩附加弯矩的计算公式为:

$$M = E(\epsilon_{拉} - \epsilon_{压})I/b \quad (4)$$

式中, M 为弯矩; E 为桩基弹性模量; $\epsilon_{拉}$ 、 $\epsilon_{压}$ 为桩基两侧应变; I 为截面形心惯性矩; b 为惯性矩方向边长。

附加轴力的计算公式为:

$$F_N = EA\epsilon_a \quad (5)$$

式中, F_N 为轴力; E 为桩基弹性模量; A 为桩基横截面面积; ϵ_a 为应变平均值。

1#~5#桩的顶部设置顶杆位移计,用于监测隧道开挖造成的桩身附加沉降;在桩端放置土压力传感器,从而得到开挖过程中桩端附加承载力的变化规律。应变计、顶杆位移计和土压力盒的布置方案如图7所示。

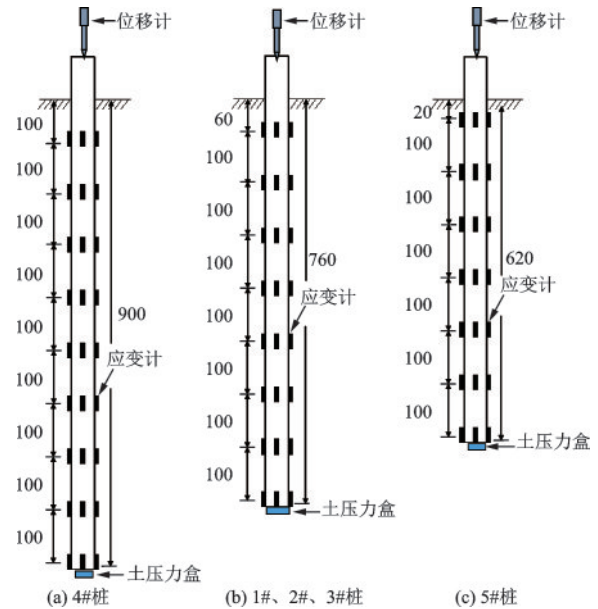


图7 桩身应变计布置

Fig. 7 Layout of strain gauges

2.4 试验过程

2.4.1 试验模型建立

试验模型采用分层夯实的方法进行填筑,每层填土的控制高度为 100 mm。试验模型中土体密度控制为 1800 kg/m³,建立试验模型时每次将 720 kg配置好的相似土体填入模型箱,刮平后夯实直至

100 mm 厚,每层填筑完成后使用水平线测试其平整度,如图 8(a)所示;填至 0.5 m 高位置处时按预先在模型箱壁标记的位置使用弹力线进行桩基定位,并埋设土压力盒及 4#桩,如图 8(b)所示;继续填土至 0.64 m 及 0.78 m,按相同方法分别埋设剩余的 4 根模型桩,如图 8(c)所示;之后填土直至目标高度 1.4 m,整平表面并安装砝码和顶杆位移计,如图 8(d)所示。填筑完成后调试传感器监测系统,准备开始试验开挖。

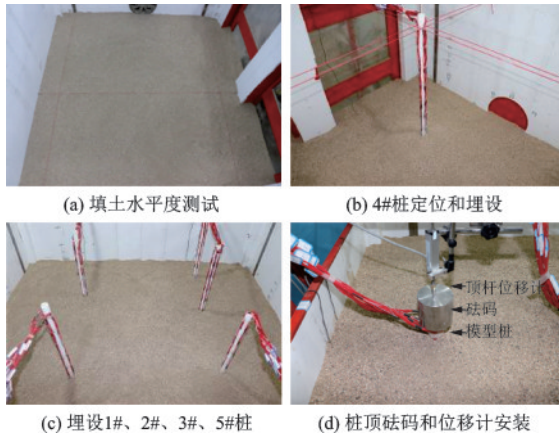


图 8 试验模型建立

Fig. 8 Establishment of test model

2.4.2 开挖方案

在卵石地层中施工时,盾构掘进速度约为 20~60 mm/min,根据相似定理模型试验中模型盾构的掘进速度为 0.44~1.33 mm/min(时间相似常数取为 1)。考虑完成隧道开挖所需要的时间,试验中掘进速度取为 3 mm/min。实际工程中盾构刀盘的转速约为 1.0 r/min,试验中盾构刀盘转速为 1.0 r/min,螺旋机转速为 4.0 r/min。试验过程中盾构开挖引起的地层损失为 2.6%。盾构机掘进过程中的推进力如图 9 所示。可以看出推进力在开挖前期迅速增大,开挖至 0.9 m 之后增长速度略减小。

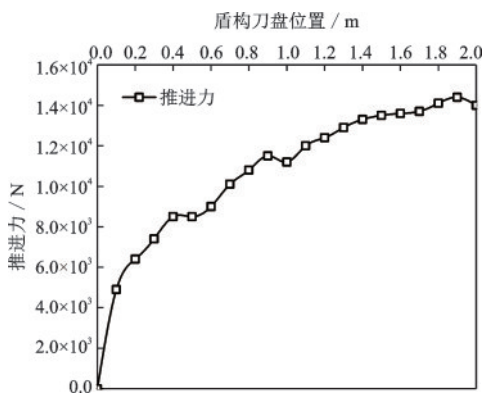


图 9 盾构机推进力

Fig. 9 Driving force of shield machine

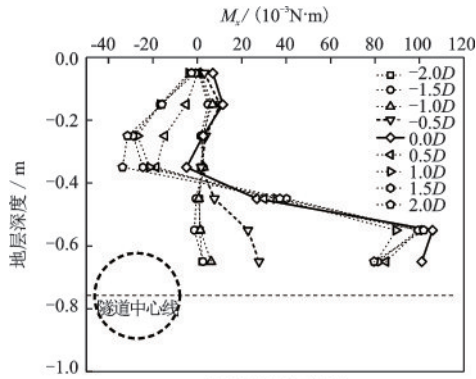
3 盾构开挖对桩基的三维扰动规律

盾构开挖对邻近桩基的三维扰动包括两个方面:一是盾构刀盘掘进到某一位置时,邻近桩基的受力变形的三维特征;二是随着盾构刀盘位置的变化既有桩基受力变形的演化规律。以 1#桩为例,本节对盾构开挖过程对邻近桩基的三维扰动规律进行了分析。文中从盾构刀盘 $-2.0D$ 至 $2.0D$ 每隔 $0.5D$ 提取这些截面的数据, D 为盾构的开挖直径,负值表示刀盘位于桩基之前,正值表示刀盘已穿过桩基。

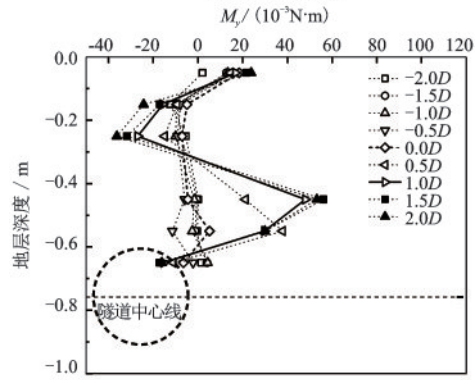
3.1 桩身附加弯矩

盾构开挖穿越既有桩基时,使桩基产生附加弯矩,既有桩基的附加弯矩可分解为沿新建隧道横截面的附加弯矩 M_x 和沿盾构开挖方向弯曲的附加弯矩 M_y 。图 10(a)和图 10(b)分别给出了 M_x 和 M_y 随盾构开挖的变化规律。可以看出,刀盘到达 $-1.0D$ 以后, M_x 开始增长,并且刀盘开挖至 $-0.5D \sim 0.0D$ 时 M_x 的增速最大;同时,随着盾构的开挖 M_x 沿桩身的分布逐渐变为 S 形(上部出现负弯矩、下部出现正弯矩),这与朱逢斌等^[16]、韩进宝等^[17]模拟得到的弯矩分布规律相似。纵向弯矩 M_y 在刀盘开挖至 $-0.5D$ 时开始增大,并在 $0.0D \sim 1.0D$ 阶段增长最显著; M_y 沿桩身的分布规律与横向弯矩规律类似,都呈现为 S 型。G.T.K. Lee 等^[18]的数值模拟结果显示 M_y 最大值是 M_x 最大值的三分之一,而对比图 10(a)、(b)可看出 M_y 最大值约为 M_x 最大值的 0.5 倍,与 C.H. Pang^[4]的现场实测数据规律接近;同时, M_x 最大值出现在隧道拱顶位置附近,而 M_y 最大值位置高于拱顶,位于桩基中部。

在开挖面到达 $1.0D$ 位置时,桩基的两个方向弯矩均基本达到最大值,通过叠加横、纵向弯矩得到刀盘到达 $1.0D$ 时桩身的总弯矩,如图 11 所示。可看出总弯矩沿桩身呈螺旋形分布,且总弯矩最大值出现在桩身下部。开挖过程中 1#桩总弯矩最大值与两个分方向弯矩最大值的对比如图 12 所示。对比发现总弯矩最大值在开挖过程中的变化规律与横向弯矩 M_x 相似,增长段主要出现在开挖面位于 $-0.5D$ 至 $0.0D$ 阶段,之后趋于稳定;总弯矩最大值与横向弯矩最大值基本相同。



(a) 横向附加弯矩



(b) 纵向附加弯矩

图10 桩身附加弯矩

Fig. 10 Additional bending moment of pile

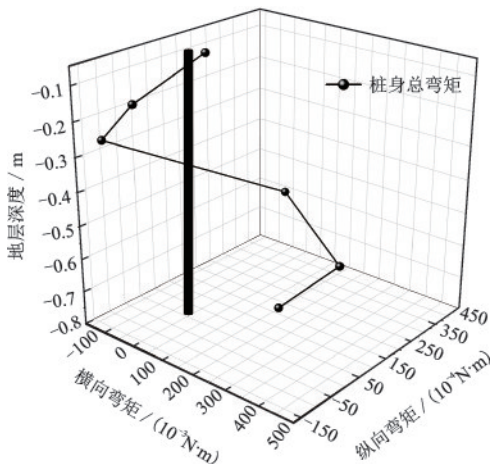


图11 桩身总弯矩(刀盘位于1.0D断面)

Fig. 11 Total bending moment of pile (cutter head at section 1.0D)

3.2 桩身附加轴力

1#桩附加轴力随盾构开挖的变化规律如图13所示。由图可以看出在刀盘到达-1.0D之前,桩基的附加轴力无明显变化;开挖面经过-1.0D后附加轴力开始增长,尤其在-0.5D~1.5D阶段增长显著;并且,刀盘处于不同位置时,开挖引起的桩基附加轴力沿桩身的分布规律相同,均表现为随埋深的增大而增大。

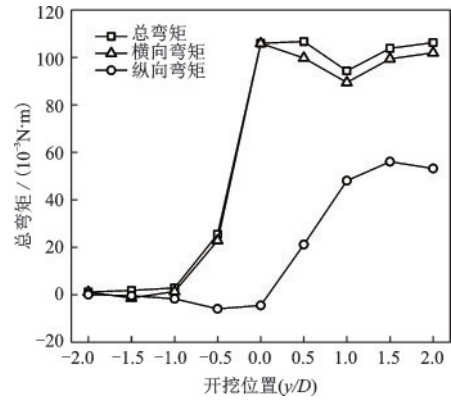


图12 三种弯矩最大值对比

Fig. 12 Comparison of three maximum bending moment values

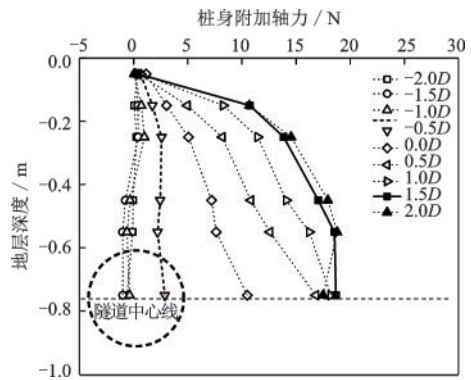


图13 桩身附加轴力

Fig. 13 Additional axial forces of pile

3.3 桩顶附加沉降

图14给出了1#桩基桩顶附加沉降随盾构开挖的变化规律。可以看出在开挖位置到达-1.0D断面之前,附加沉降基本无变化,而当开挖位置到达-1.0D至1.0D断面这一阶段附加沉降迅速增长,刀盘穿过1.0D断面后附加沉降趋于稳定。

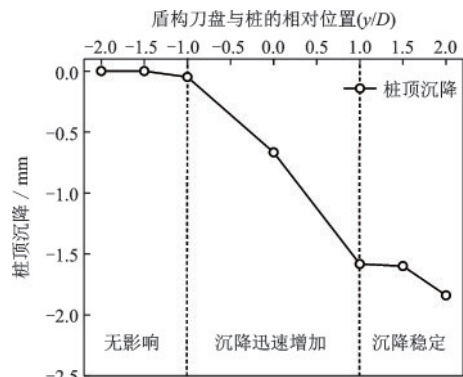


图14 桩顶附加沉降

Fig. 14 Additional settlement of pile top

3.4 桩端附加承载力

1#桩基桩端处附加承载力随盾构开挖的变化

规律如图 15 所示,负值为加载。可以看出当刀盘开挖至 $-1D$ 时,附加承载力开始增大,在 $-0.5D \sim 1.0D$ 阶段增长最显著,之后直至 $2.0D$ 附加承载力仍持续增长,但增速略减小。盾构开挖通过邻近桩时使桩侧土体松散,使桩-土之间摩擦力减小,从而导致桩端承载力增大。对比试验结果与荣建^[19]的原位试验结果,得出试验中盾构开挖产生的扰动范围与现场监测的结果相似,都是在 2 倍开挖直径以内,证明了试验结果的合理性。

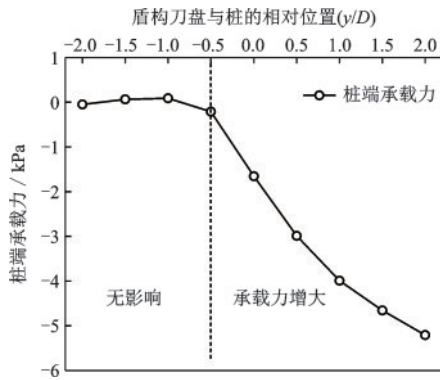


图 15 桩端附加承载力

Fig. 15 Additional bearing capacity of pile end

4 空间位置对桩基扰动规律的影响

通过 1#、2#、3# 桩试验数据的对比,分析了桩-隧不同水平距离对桩基扰动规律的影响。对比 1#、4# 及 5# 桩数据,分析了桩端的相对竖向位置对桩基扰动规律的影响。桩基总弯矩随盾构开挖的变化规律与横向弯矩基本相同,本节讨论的弯矩均为横向弯矩。

4.1 桩-隧道水平间距影响

4.1.1 桩身附加弯矩

上文研究显示当盾构刀盘掘进至 $0.0D$ 位置时 1# 的弯矩基本达到最大,因此对于 1#、2#、3# 桩提取了刀盘到达 $0.0D$ 位置处时弯矩,研究桩-隧水平间距的不同对桩身附加弯矩的影响,如图 16 所示。可以看出桩基附加弯矩最大值随着桩-隧水平距离的增大而减小,3# 桩的附加弯矩最大值只有 1# 桩的约 10%。同时,可以发现 1# 桩附加弯矩的最大值出现在拱顶位置附近,2# 桩和 3# 桩弯矩最大值出现的位置随着距隧道距离的增大而沿桩身逐渐上移。

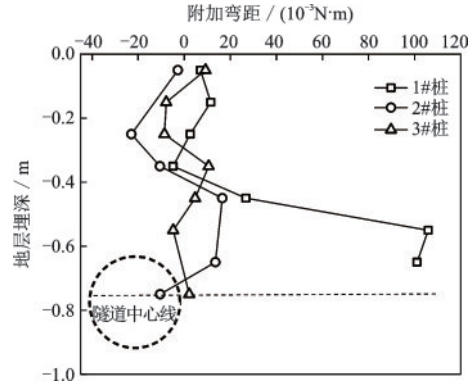


图 16 1#、2#、3# 桩附加弯矩对比

Fig. 16 Comparison of bending moments of piles 1#, 2# and 3#

4.1.2 桩身附加轴力

上文得出刀盘掘进至 $1.5D$ 位置时 1# 桩的附加轴力基本增长至最大值,因此对比 1#、2#、3# 桩在 $1.5D$ 截面的附加轴力如图 17 所示。可以发现,1#、2# 桩基沿桩身的附加轴力分布都随着桩身埋深的增大而增大。随着距离隧道水平距离的增大,桩基附加轴力明显减小,3# 桩附加轴力最大值只有 1# 桩附加轴力最大值的约 30%。

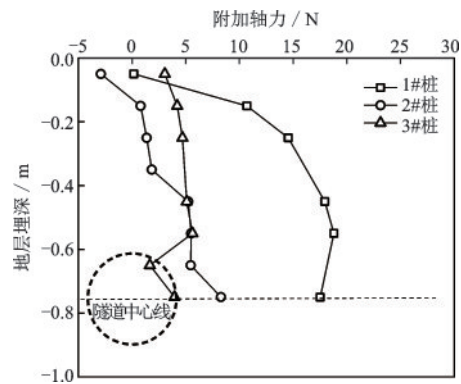


图 17 1#、2#、3# 桩附加轴力对比

Fig. 17 Comparison of axial forces of piles 1#, 2# and 3#

4.2 桩端-隧道竖向相对位置影响

4.2.1 桩身附加弯矩

图 18 给出了盾构刀盘开挖至 $0.0D$ 截面时 1#、4# 及 5# 桩附加弯矩,可以看出桩身的最大弯矩的位置受桩端位置的影响显著,1# 桩桩基附加弯矩最大值出现在隧道的拱顶处,4# 桩附加弯矩最大值出现在隧道中心线处,5# 桩附加弯矩最大值在桩基中部。对比三根桩基弯矩最大值,得出 1# 桩与 4# 桩的弯矩最大值基本相同,而 5# 桩的较小,仅为 1# 桩最大值的 20%,这与 N. Loganathan 等^[6]的试验规律相似。

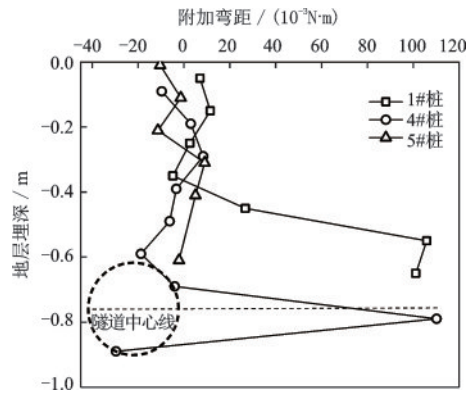


图18 1#、4#、5#桩附加弯矩对比

Fig. 18 Comparison of bending moments of piles 1#, 4# and 5#

4.2.2 桩身附加轴力

盾构刀盘开挖至 $1.5D$ 断面时1#、4#及5#桩基附加轴力值如图19所示。可看出1#桩与5#桩的附加轴力随桩身埋深的增大而增大；4#桩隧道中心线以上部分的附加轴力随埋深的增加而增大并在隧道中心线深度处达到最大值，到中心线以下附加轴力开始减小。

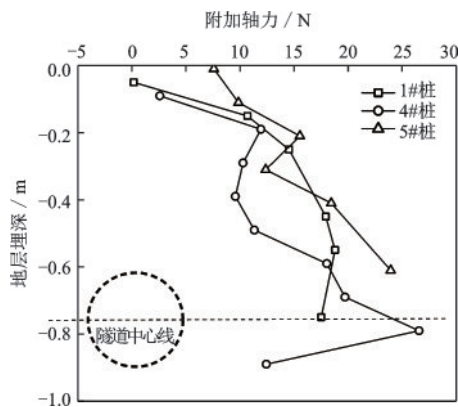


图19 1#、4#、5#桩附加轴力对比

Fig. 19 Comparison of axial forces of piles 1#, 4# and 5#

4.3 附加桩端承载力

由桩端埋置的土压力盒测得1#、3#及4#桩基桩端处承载力在开挖过程中的变化(图20)。对比发现3#桩桩端承载力增值明显小于1#、4#桩,原因为3#桩距离隧道较远,桩侧土体受隧道开挖影响较小,因此桩端所承受的竖向荷载增加较少；4#桩与1#桩桩端承载力变化规律基本相同,都是在 $-1D \sim 2D$ 阶段迅速增大。

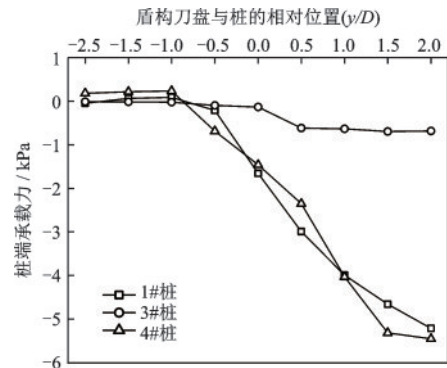


图20 1#、3#及4#桩桩端承载力

Fig. 20 Bearing capacity at the end of piles 1#, 3# and 4#

5 结论

(1)盾构开挖对桩基产生的影响随着开挖进行而增大,横向附加弯矩主要产生在 $-0.5D \sim 0.0D$ 阶段,横向弯矩最大值是纵向弯矩最大值的2倍,两方向叠加的总弯矩最大值与横向弯矩最大值基本相同;附加轴力主要产生在 $-0.5D \sim 1.5D$ 阶段;桩顶附加沉降主要产生在 $-1.0D \sim 1.0D$ 阶段;桩端附加承载力在 $-0.5D \sim 2.0D$ 阶段持续增长。

(2)桩基的附加弯矩和附加轴力均随着与隧道水平距离的增大而减小,距离隧道边缘 $2D$ 的桩基附加轴力最大值只有距离为 $0.5D$ 桩基附加轴力最大值的30%;随着距隧道距离的增加,桩基附加弯矩最大值的位置有沿桩身上移的趋势。

(3)不同桩端位置桩基的附加弯矩最大值出现的位置不同;桩端位于隧道拱顶的桩基其附加弯矩明显小于桩端位于中心线及拱底处桩基的附加弯矩;桩端位于隧道中心线及拱顶的桩基附加轴力随桩身埋深的增大而增大,而桩端位于隧道拱底的桩基在中心线以下的部分附加轴力开始减小。

参考文献:

- [1] 张志强,何川.深圳地铁隧道邻接桩基施工力学行为研究[J].岩土工程学报,2003,25(2):204-207.
Zhang Z Q, He C. Study on the mechanical behaviour of a metro tunnel construction adjacent to existing pile foundations in Shenzhen [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 204-207. (in Chinese)
- [2] 杨晓杰,邓飞皇,聂雯,等.地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,

- 2006, 25(6): 1290-1295.
- Yang X J, Deng F H, Nie W, et al. Study on effect of metro tunneling on carrying capacity of pile foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1290-1295. (in Chinese)
- [3] 彭坤, 陶连金, 高玉春, 等. 盾构隧道下穿桥梁引起桩基变位的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 485-489.
- Peng K, Tao L J, Gao Y C, et al. Numerical analysis of bridge pile deformation caused by shield tunnel construction underneath [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 485-489. (in Chinese)
- [4] Pang C H. The effects of tunnel construction on nearby pile foundation[D]. Singapore: National University of Singapore, 2006.
- [5] 沈建文. 北京地铁工程施工对既有市政桥梁基础的影响及评估研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- Shen J W. Research on the influence and evaluation of metro construction on municipal bridge pile foundation in Beijing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [6] Loganathan N, Poulos H G, Stewart D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations[J]. Géotechnique, 2000, 50(3): 283-294.
- [7] Chiang K H, Lee C J. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44 (10) : 1224-1241.
- [8] Ran X. Tunnel pile interaction in clay[D]. Singapore: National University of Singapore, 2004.
- [9] Jacobsz S W, Standing J R, Mair R J, et al. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 49-56.
- [10] 杨敏, 孙庆. 隧道开挖对邻近桩基影响的研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 118-126.
- Yang M, Sun Q. Research summary of tunnel excavation effects on adjacent pile foundation [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1): 118-126. (in Chinese)
- [11] Ng C W W, Lu H, Peng S Y. Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on an existing pile [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35: 189-199.
- [12] Ng C W W, Soomro M A, Hong Y. Three-dimensional centrifuge modelling of pile group responses to side-by-side twin tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43: 350-361.
- [13] 马少坤, 吕虎, Wong K S, 等. 双隧道对群桩影响的三维离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1337-1342.
- Ma S K, Lyu H, Wong K S, et al. Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on existing pile group in expansive clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1337-1342. (in Chinese)
- [14] 马少坤, Wong K S, 吕虎, 等. 膨胀土地基中隧道施工对群桩影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3055-3060.
- Ma S K, Wong K S, Lyu H, et al. Study of effects of tunnel construction on pile group in expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3055-3060. (in Chinese)
- [15] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [16] 朱逢斌, 杨平, Ong C W. 盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 298-302.
- Zhu F B, Yang P, Ong C W. Numerical analysis on influence of shield tunnel excavation to neighboring piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 298-302. (in Chinese)
- [17] 韩进宝, 熊巨华, 孙庆, 等. 邻近桩基受隧道开挖影响的多因素三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增2): 339-344.
- Han J B, Xiong J H, Sun Q, et al. Multi-factor three-dimensional finite element analysis of effects of tunnel construction on adjacent pile foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup2): 339-344. (in Chinese)
- [18] Lee G T K, Ng C W W. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 193-201.
- [19] 荣建. 砂砾地层地铁盾构施工过程土体扰动特性的原位试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- Rong J. In-situ experimental research on soil disturbance characteristics during the subway shield construction process in the grit & pebble stratum [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)