

开挖面局部应力对临近桥梁桩基扰动影响研究

李文杰^{1,2}, 杨振兴^{2,3}, 王江锋¹, 杨杰⁴, 陈宏明⁵

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001;
3. 中国中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458; 4. 中国中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450001;
5. 重庆市铁路(集团)有限公司, 重庆 410700)

摘要: 为了研究盾构开挖面中心应力集中现象对侧穿的桥梁桩基的扰动, 以广东省某大直径盾构隧道近距离侧穿既有桥梁桩基为工程背景, 运用 Midas 有限元模拟分析施工过程中开挖面出现集中应力时对桥梁桩基竖向与水平位移影响, 并通过线性回归方程预测开挖面允许出现的最大集中应力。结果表明: 在泥水应力 550 kPa, 集中应力 983 kPa 情况下桩体最大水平位移达到 6.87 mm, 已超过预警值, 需提前采取加固措施; 线性回归分析得到在保证桩体水平位移符合规范条件下, 开挖面允许最大集中应力为 773 kPa。掘进压力主要使桩体产生水平方向上的挠曲变形并且在与隧道轴线同一埋深位置的桩体变形量最大, 集中应力的出现使得桩体挠曲变形量增大。

关键词: 盾构隧道; 应力集中; 侧穿桥桩; 桩基位移; 数值模拟

中图分类号: TU94⁺1; U455.43 文献标识码: A 文章编号: 1672-1144(2024)01-0156-07

Influence of Local Stress on the Disturbance of Nearby Bridge Pile Foundations in Excavation Faces

LI Wenjie^{1,2}, YANG Zhenxing^{2,3}, Wang Jiangfeng¹, YANG Jie⁴, CHEN Hongming⁵

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China;
2. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou, He'nan 450001, China;
3. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China;
4. China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450001, China;
5. Chongqing Railway Group Co., Ltd., Chongqing 410700, China)

Abstract: In order to analyze the disturbance of the stress concentration phenomenon in the center of the shield excavation face on the side-crossing bridge pile foundation, a large-diameter shield tunnel in Guangdong Province was taken as the engineering background. The Midas finite element program was used to simulate and analyze the influence of the concentrated pressure on the vertical and horizontal displacement of the bridge pile foundation during the construction process, and the maximum allowable concentrated pressure of the excavation face was predicted by the linear regression equation. The results show that the excavation pressure mainly causes the pile body to produce the horizontal deflection deformation, and the deformation of the pile body at the same buried depth with the tunnel axis is the largest. The occurrence of concentrated pressure increases the deflection deformation of the pile body. Under the mud water pressure of 550 kPa and concentrated pressure of 983 kPa, the maximum horizontal displacement of the pile body reaches 6.87 mm, which has exceeded the warning value. Therefore, reinforcement measures shall be taken in advance. For this project, the linear regression analysis shows that the maximum allowable concentration pressure of the excavation surface is 773 kPa under the condition that the horizontal displacement of the pile conforms to the specification.

Keywords: shield tunnel; pressure concentration; side-crossing the bridge pile; displacement of pile foundation; numerical simulation

随着我国交通建设的发展,隧道工程取得了长足的发展与进步,同时对跨江跨海高风险水下隧道的需求量也逐渐增大^[1-2]。但由于受到施工环境的限制,不可避免的会出现盾构隧道穿越桥梁等既有建筑物的情况,不仅会扰动周围土体,使得桩基受力状态发生改变,引起上部既有建筑的不均匀沉降,更严重时会导致结构的失稳破坏。同时由于上部结构荷载的存在,会加大桩基的位移与变形,甚至可能对隧道的稳定性产生一定的影响^[3-4],因此隧道下穿既有桥梁对桩基扰动的影响越来越引起专家与学者们的高度重视。

目前,国内外学者就隧道下穿既有桥梁对桩基的影响已经有很多研究。Poulos H G 等^[5]通过三次离心机模型试验评估了隧道开挖引起的黏土地面变形及其对相邻桩基的影响。Wang Zhe 等^[6]对盾构下穿桥梁对桩基的影响进行研究,提出了一种改进的加固措施并取得了良好的效果。Zhu lei 等^[7]在 Midas 上开发了一个数值模型模拟盾构下穿桥梁桩基整个施工过程,得出了盾构隧道与桥梁轴线间的安全距离。周鑫等^[8]运用三维有限元软件模拟盾构开挖施工的全过程,研究开挖过程对地层沉降及邻近桥梁桩基影响规律。张恒等^[9]以深圳地铁 5 号线为依托,利用数值模拟模型对施工产生的地表沉降及桥梁桩基的侧向变形进行了预测分析。宋慧林^[10]以北京地铁 14 号线丽菜区间隧道开挖为工程背景,在数值分析的基础上,结合实际监测数据开展隧道施工的地层位移及既有桥梁桩基础的受力影响。黄戡等^[11]基于 Pasternak 地基模型推导分层地基中盾构施工引起的邻近桩基竖向和水平位移理论解,并建立三维有限元模型,结合现场实测对比各种计算工况下桥墩沉降量和桩身竖向位移。综上所述,大多研究以单一的开挖面压力模拟盾构隧道开挖过程,然而在现场施工过程中,开挖面压力并不是一成不变的^[12],甚至可能出现泥水仓压力无规则分布、刀盘中心区域应力集中等现象。

广东省某大直径盾构隧道侧穿桥梁桩基时,出现开挖面中心应力集中现象,有可能对桥梁安全构成威胁。因此,为了对施工过程中桥梁安全性进行评估,采用数值模拟的方法研究在开挖面中心应力集中的情况下掘进压力对桥梁桩基的扰动影响,评价工程安全性,预测允许出现的最大集中应力,为今后类似工程提供经验参考。

1 工程概况

1.1 交叉段桥梁与隧道概况

广东省某大直径盾构隧道所穿越桥梁总长度为 4 200 m,其中跨越水道总长 2 774 m,桥面设计宽 31 m,为双向六车道,设计荷载为城市 A 级。主墩承台采用 C35 混凝土,厚度为 2.5 m,每个主墩采用 2 根 $\phi 2000$ 强度为 C30 的钻孔灌注桩,采用摩擦桩设计,设计桩顶标高 3.0 m,桩底标高分别为 -82 m (#48 桥墩 1、2 号桩)、-78 m (#49 桥墩 3、4 号桩),桩长分别为 85 m 和 81 m。

盾构隧道开挖直径 13.32 m,埋深 48.01 m ~ 48.81 m,穿越大桥段平面位于线路直线段,纵断面位于线路 18.8% 下坡段。隧道走向与桥梁成 56° 夹角,距离 49# 右侧桥墩最近距离 3.16 m,与 48# 左侧桥墩最近距离 3.85 m,平均水深 2.03 m ~ 3.31 m。盾构隧道与桥梁位置关系如图 1 所示。

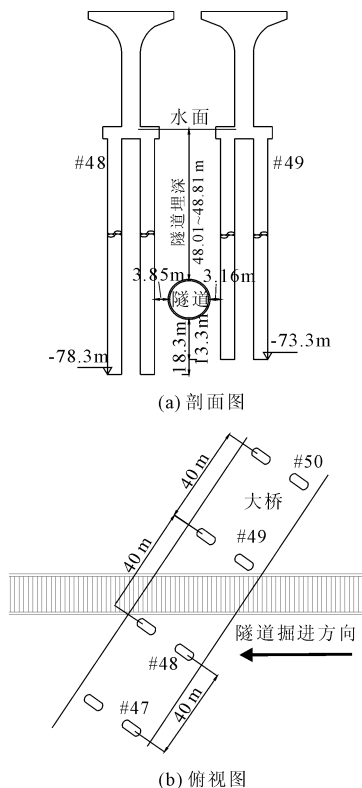


图 1 盾构隧道与桥梁位置示意图

1.2 地质概况

盾构隧道穿越桥梁区间水面以下覆土深度约为 38 m,地层自上到下依次为淤泥、淤泥质土、粉质黏土、细砂、全风化片岩、强风化片岩。隧道穿越范围内上部分为全风化片岩,下部分为强风化片岩,地层主要参数如表 1 所示。

表 1 地层主要参数

名称	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^{\circ}$)
淤泥	15.9	6	0.420	7.90	4.30
淤泥质土	17.7	9	0.420	15.70	5.60
粉质黏土	19.9	21	0.285	28.19	9.81
粉质黏土	18.7	15	0.420	22.70	7.00
细砂	20.0	66	0.285	0.00	35.00
全风化片岩	19.8	45	0.260	51.73	20.69
强风化片岩	25.5	90	0.230	60.00	27.00

2 数值模型建立

根据现场施工反馈的数据,盾构掘进过程中开挖面中心区域出现了应力集中现象,这与设计的泥水仓应力存在偏差。为了研究此集中应力区域在掘进过程中是否会对桥梁桩基产生影响,采用有限元软件 Midas 对该工况下的盾构掘进过程进行数值模拟分析,预知潜在的风险,消除安全隐患,以确保桥梁桩基安全和施工顺利进行。

2.1 地层简化

为了使计算结果更加符合需求且能更直观地观察到桩基的位移变形效果,根据地层参数表对地层进行简化,具体方法为将力学特性与参数相似的两种土层,参考各自土层厚度进行加权平均从而简化为一种土层,简化后的地层力学参数如表 2 所示。

表 2 简化后地层参数

名称	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^{\circ}$)
淤泥质土	16.3	7.5	0.420	12.00	5.00
粉质黏土	19.3	18.0	0.350	25.70	8.50
细砂	20.0	66.0	0.285	0.00	35.00
全风化片岩	19.8	45.0	0.260	51.73	20.69
强风化片岩	25.5	90.0	0.230	60.00	27.00

2.2 模型概况

考虑到盾构隧道开挖直径为 13.32 m,影响范围为 3~5 倍洞径,取模型边界尺寸为 120 m×100 m×100 m,模型概况如图 2 所示,地层采用摩尔-库仑模型,以四面体网格划分,设置单个网格尺寸 3 m,靠近隧道及桩基的土体网格采用 2 m 尺寸控制,如图 2(a)所示。模拟盾构开挖 50 环,盾构掘进至第 15 环时与#49 桩基距离最近,15~35 环为盾构驶入桥梁范围内,掘进至第 35 环时盾构机与#48 桩基距离最近,之后驶离桥梁范围。

桥梁承台选用 2D 板单元模拟,设置网格尺寸 1

m,材料属性为 C35 混凝土,弹性模量 31.5 GPa,泊松比 0.3,容重 20 kN/m³;桥桩采用 1D 梁单元模拟,网格尺寸 1 m,桩体直径 2 m,使用材料为 C30 混凝土,弹性模量 30 GPa,泊松比 0.3,容重为 20 kN/m³,承台和桥桩均采用弹性模型。承台上部荷载分别为#48 桩基 1 047 kPa、#49 桩基 1 122 kPa。桩基与隧道模型如图 2(b)。

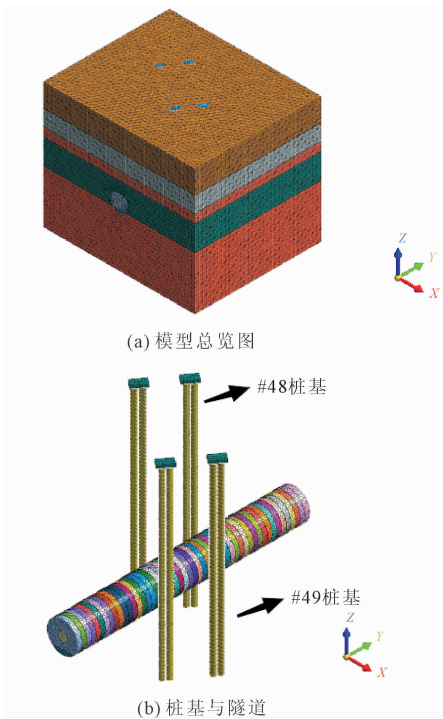


图 2 模型概况

2.3 工况设置

根据施工方案设计的掘进参数,泥水仓压力保持在 5.0 bar~6.0 bar,但开挖过程现场反馈的数据中,在盾构尚未驶入桥梁范围内时,开挖面中心直径为 4.176 m 的圆形区域内出现了大小约为 600 t 的额外集中压力,集中压力的出现极有可能增大盾构掘进对桥梁桩基的扰动,从而造成安全隐患,故本研究将以两种工况进行数值模拟分析,即正常泥水压力、开挖面中心出现 600 t 额外集中压力两种工况。为更准确地对刀盘中心区域施加集中压力,将应力集中工况中的隧道开挖区域分割为两个部分,一部分为施加正常泥水压力区域,另一部分为开挖面中心压力集中区域。压力施加方式为:开挖一环后激活相应的开挖面压力,钝化上一环所施加压力,以此往复。两种工况开挖面压力施加如图 3 所示。

考虑到本次研究内容为开挖面压力对桥梁桩基的影响,在开挖过程中需排除管片及注浆等因素对

桥梁桩基的影响,故本次数值模拟忽略管片以及注浆过程,开挖后直接在隧道内壁施加环向约束,以消除地层损失的影响。

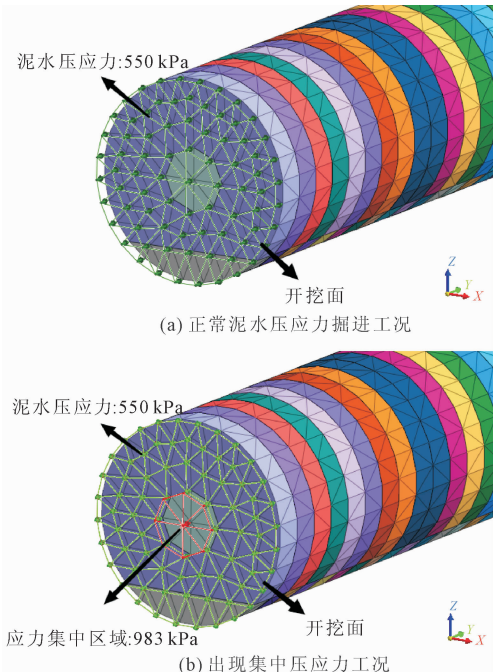


图 3 两种工况下施加在开挖面上的压应力

3 计算结果分析

盾构掘进过程中掘进压力引起的桩基周围土体

的内力以及附加应力影响了桩基本身的应力平衡状态^[13-14],土体应力状态变化产生的位移对桩基产生拖拽作用,进而引起桩基的竖向以及水平位移变形。

3.1 桩体延桩深位移变形

因隧道呈一定角度穿越桥梁桩基,盾构掘进至与两桩基最近距离时所处工况不同,盾构掘进至 15 环时与#49 桩基距离最近,掘进至 35 环时与#48 桩基最近,故提取盾构掘进至 5、15、25、35、50 环时 5 种施工阶段下桥桩位移变形量进行分析。

如图 3 所示,两种工况下桩基总位移云图如图 4、图 5 所示。由桩体的总位移云图可以看出:随着盾构掘进逐渐接近桩体,其总位移量也不断增大;桩体延桩深方向上位移变形基本呈现逐渐增大趋势。

延桥桩埋深方向等距离提取点位数据,绘制出桥桩延桩深位移趋势如图 6、图 7。由图 6、图 7 可以发现:从桩的整体位移变形来看,桩顶部位移量最小;由于掘进压力在隧道周围土体的传递作用,与盾构隧道施工区域相对应的桥梁桩基显现出向外的挠曲变形,且桥梁桩基与隧道轴线距离越近,挠曲变形越大,隧道轴线埋深附近的桩体位移量达到最大并趋于稳定。通过对比出现集中压力与未出现集中压力两种工况下的桩体位移,可以看出在不同掘进压力下,同一个桥桩随桩深的位移变形曲线走势基本相同。

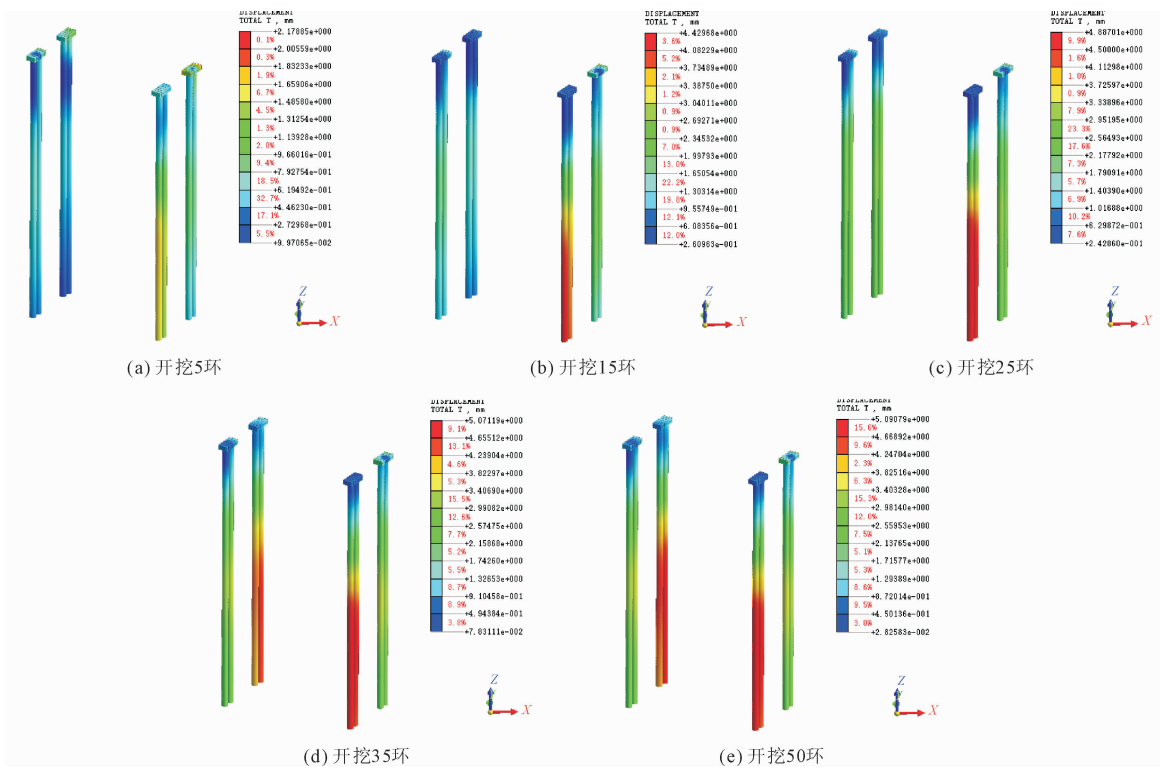


图 4 正常泥水应力下桩基总位移云图

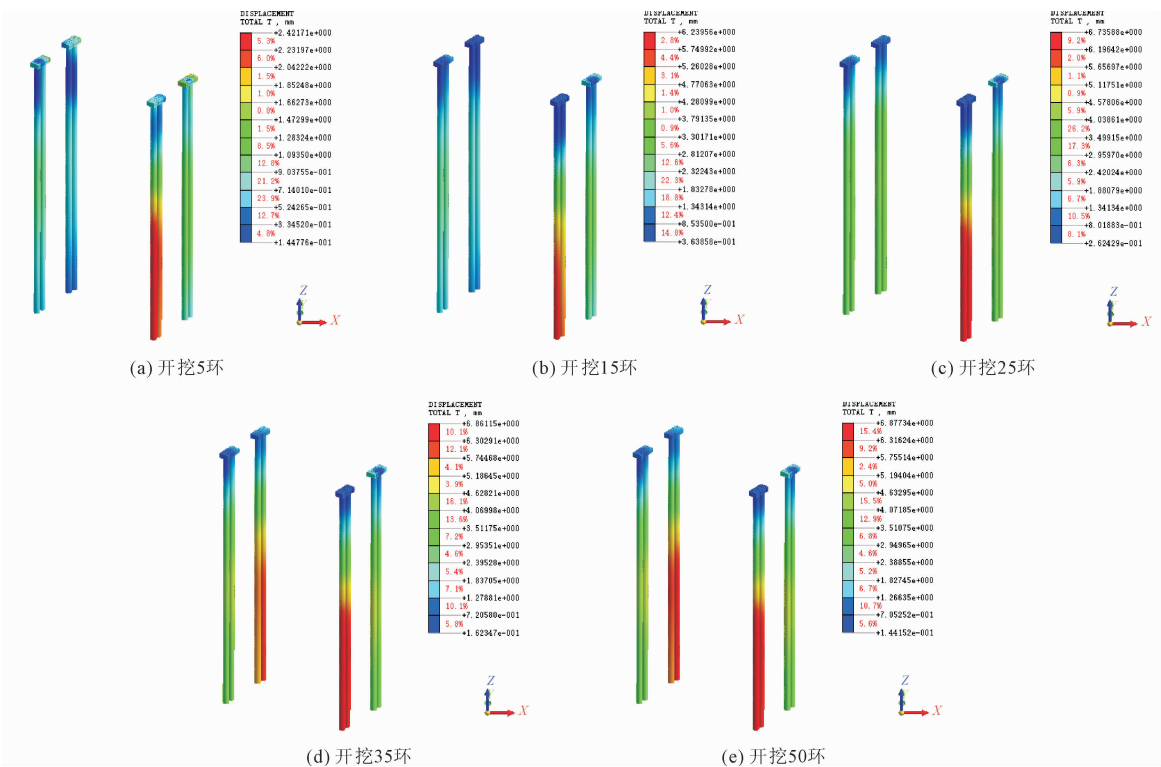


图 5 集中应力下桩基总位移云图

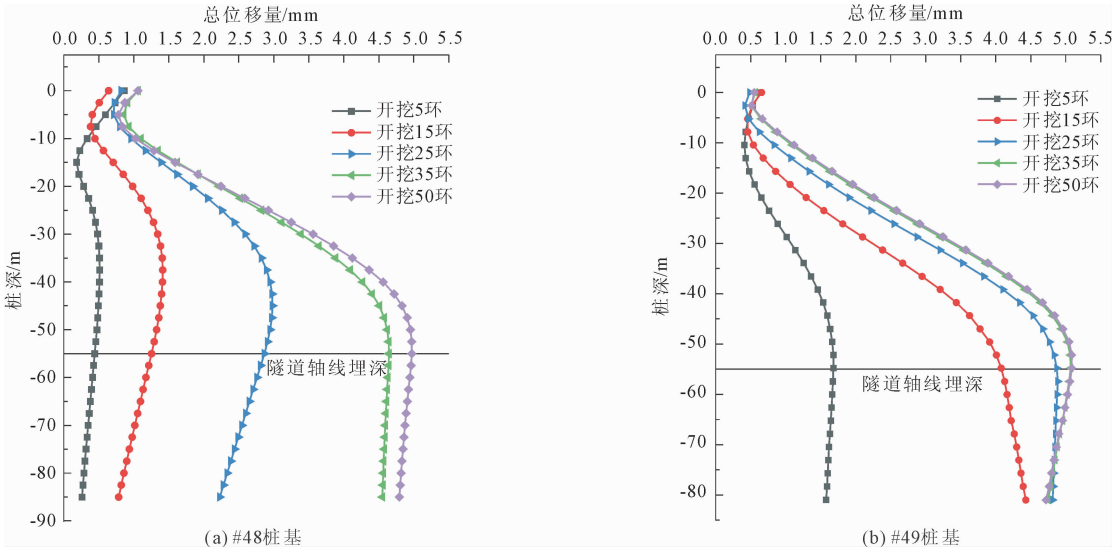


图 6 正常泥水应力下桩基延桩深位移

3.2 桩体随盾构掘进位移变形

由前文可知,不同施工阶段下桩体最大位移点基本出现在与隧道轴线为同一水平面上的位置,分别取#48、#49 桩体最大位移点位作为监测点,提取两种工况下最大位移点位在整个掘进过程中的水平位移与竖向位移如图 8、图 9。

通过对比图 8、图 9 中#48 号桩体与#49 号桩体随盾构掘进的水平与竖向位移可以发现,在盾构尚

未掘进至与桩体最近位置时,每一步掘进都会使桩体水平位移增大,针对#48 号桩体来讲,桩体的水平位移在前 15 环的掘进过程中增加的相对较缓慢,在掘进至 15 环时(距离与桩体最近位置 40 m 处),桩体水平位移逐渐呈现大幅直线上升趋势。盾构机在达到与桩基最近位置时,桩体水平位移量增大趋势有所减缓,驶离桩基后逐渐趋于稳定。正常泥水压力下#48 号桩体最大水平位移为 4.93 mm, #49 号桩

体最大水平位移为 5.09 mm;开挖面中心出现 600 t 集中压力后#48、#49 桩体水平最大水平位移分别为 6.59 mm、6.87 mm,可以得出随着集中压力的出现,

#48、#49 桩体最大水平位移分别增加了 1.66 mm、1.78 mm。

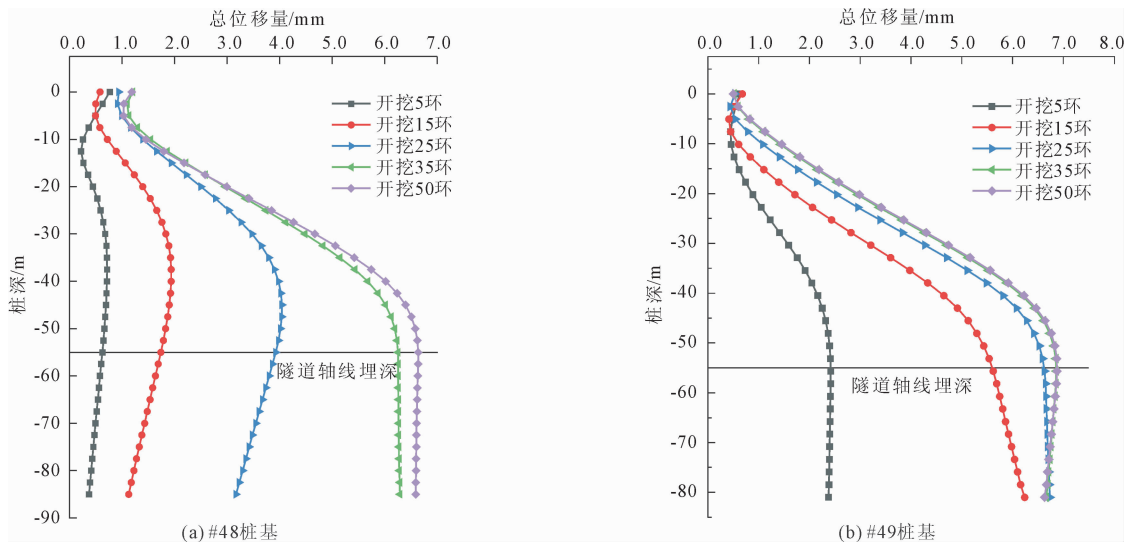


图 7 集中应力下桩基延桩深位移

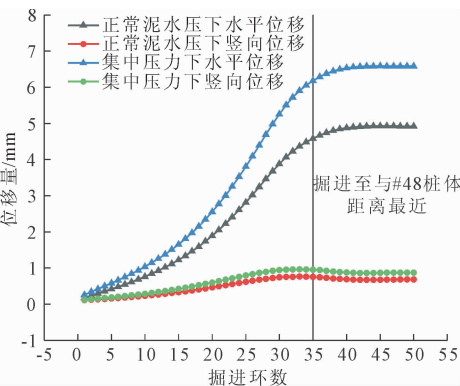


图 8 #48 桩体最大水平与竖向位移

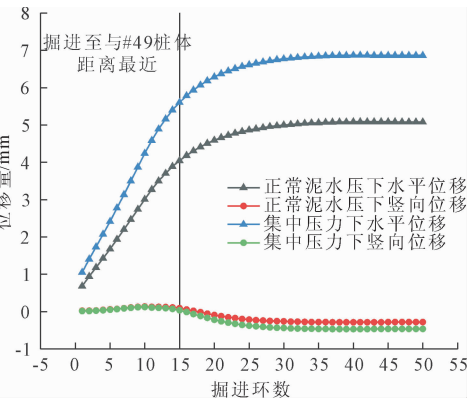


图 9 #49 桩体最大水平与竖向位移

随着盾构掘进,正常泥水压力下#48 桩体上浮呈现先增大后微量减少趋势,在盾构机与桩体最近位置时出现最大值,为 0.76 mm;#49 桩体呈现先少

量上浮后下沉的趋势,最大上浮量为 0.14 mm,最大下沉量为 0.28 mm。开挖面集中压力的出现使得桩体的上浮以及下沉量都少量地变大,变化范围均小于 0.2 mm,可见集中压力的出现对桩体竖向位移变形的影响很小,并且桩基竖向位移变形趋势与正常泥水压应力情况下基本相同。

3.3 工程安全评估分析

根据《公路养护技术规范》^[15] (JT/G H10—2009)5.4 条规定,桥梁桩基允许变形范围如表 3。

表 3 桥梁桩基允许变形

监测项目	变形特征	最大变形允许值/mm
桥梁墩台均匀总沉降值	桥面沉降	20/ $\sqrt{L}$
桥梁相邻墩台均匀总沉降差值	桥面倾斜	10/ $\sqrt{L}$
墩顶面水平位移值	桥面偏移	5/ $\sqrt{L}$

注: L 为相邻墩台间最小跨径,以米计。跨径小于 25 m 时,仍以 25 m 计。

考虑到桥梁先期已发生的沉降变形以及为后期运营过程中产生的变形提供余量,其容许变形量以规范规定的 30% 为预警值,又依据《建筑桩基技术规范》^[16] (JGJ 94—2008)得到桩体变形模拟计算值与预警值对比如表 4。由表 4 可见,掘进压力对桩体的沉浮影响极小,对桩体的水平位移影响较大,正常泥水应力与集中应力下桩体的沉浮与桥墩顶面水平位移值均满足规范要求,但是在集中压力下,桩体的水平位移值明显已超过预警值,故施工中需对周

围土体采取一定加固措施。

监测项目	最大位移 允许值/mm	数值模拟计算值/mm	
		泥水应力 550 kPa 作用下	集中应力 983 kPa 作用下
桥梁墩台均匀总沉降值	36	0.76	0.96
桥梁相邻墩台均匀 总沉降差值	18	1.04	1.42
墩顶面水平位移值	9	1.12	1.23
桩体水平位移值	6	5.09	6.87

4 最大允许集中应力预测

由前述内容可知,盾构掘进压力对桩体竖向位移变形影响极小,对桩体水平位移及挠曲变形有较大的影响,考虑到工程掘进过程中有可能再次出现开挖面中心应力集中的现象,并且集中应力的未知,故对盾构掘进过程中可能出现的集中应力进行数值模拟试算,得到各集中应力下对应的桩体最大水平位移变形量,通过线性回归分析,推测出桩体达到水平位移预警值时所对应的集中应力,为现场安全施工提供参考。

因此取集中应力 750 kPa、1 200 kPa 进行数值模拟试算,提取不同集中应力值下桩体的最大水平位移值,通过线性回归拟合曲线分析,得到桩体最大水平位移随集中应力变化趋势如图 10 所示。

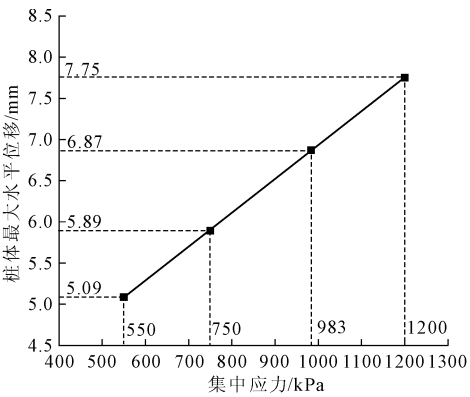


图 10 集中应力与桩体最大水平位移拟合曲线

以 y 表示桩体最大水平位移量(mm), x 表示为集中应力大小(kPa),得到拟合公式为:

$$y = 2.86052 + 0.00402x + 4.99585 \times 10^{-8}x^2$$
$$R^2 = 0.9998 \tag{1}$$

由式(1)可以得到桩体最大水平位移达到预警值 6 mm 时所对应的集中应力为 773 kPa,因此当掘进过程中开挖面出现集中应力并且压应力达到 773 kPa

时,需考虑对土体进行加固,以免造成安全隐患。

5 结 论

盾构隧道在掘进过程中很有可能出现开挖面应力集中现象,为研究此集中应力是否会对隧道所穿的既有桥梁桩基造成安全隐患,以国内某盾构下穿桥梁工程为背景,利用数值模拟计算的方法,分析当开挖面中心出现不同集中应力时对临近桥梁桩基的扰动影响,得出如下结论:

(1) 掘进压力对桩基的竖向位移变形影响极小,几乎可以忽略,但对桩体的横向变形影响较大,其原因是盾构掘进过程中掘进压力挤压前方土体使得桩基周围土体内力变化,进而带动桩基产生横向挠曲变形。

(2) 在掘进压力作用下,桩体顶部水平位移变形量最小,随桩体埋深增大而逐渐增大,在与隧道轴线同一水平线上方 2 m 左右处产生的挠曲变形最大,因此在对桩体周围土体进行加固时需着重考虑该埋深下的部分。

(3) 盾构以正常泥水压应力下掘进时,桩基墩顶面的最大水平位移量与桩体最大水平位移量分别为 1.12 mm、5.09 mm,均满足相应规范要求;当掘进过程中刀盘中心区域内出现 983 kPa 的集中压应力时,桩基墩顶面最大水平位移量为 1.23 mm,满足相关规范要求,但桩体最大水平位移达到了 6.87 mm,已超过规范允许值,需对桩体周围土体采取一定加固措施。针对本工程线性回归分析,若施工过程中刀盘中心出现集中应力并超过 773 kPa 时,需采取一定加固措施确保桥梁安全。

参考文献:

[1]

《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报,2022,35(4):1-40.

[2]

洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设,2015,35(2):95-107.

[3]

袁海平,王 斌,朱大勇,等. 盾构近距离侧穿高架桥桩的施工力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(7):1457-1464.

[4]

任 磊,朱 颖,崔天麟. 盾构超近距离侧穿铁路桥桩保护方案探讨[J]. 地球科学,2021,46(6):2278-2286.

[5]

Poulos H G, Stewart D P, Loganathan N. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations[J]. Géotechnique, 2000,50(3):283-294.

- 184.
- [4] 公路桥涵标准图 装配式预应力混凝土简支梁:JT/GQS024—83. [S]. 北京:人民交通出版社,1983.
- [5] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [6] 徐志强. 公路 T 梁桥拓宽拼接技术研究[D]. 南京:东南大学,2005.
- [7] 梁志广,王甲辰,王 萍,等. 大跨度连续箱梁桥拓宽梁体与原梁体的连接[J]. 公路交通科技,2007,24(2):65-69.
- [8] 黄 萍. 预应力混凝土 T 梁变宽拼宽静力特性分析[J]. 公路交通科技,2010(3):86-92.
- [9] 冯 宇. 钢-混组合梁加宽 T 梁桥的受力性能分析[D]. 西安:长安大学,2018.
- [10] 杨成艳. 公路钢筋混凝土梁式桥上部结构拼接方案研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [11] Anon. Computer design aids bridge widening[J]. Civil Engineers Australia, 2004,76(9):22.
- [12] Ferretti T L, Indovino A, Marchiondelli A. Modernisation and widening interventions of bridge structures on the Adriatic highway in Italy[J]. International Association for Bridge and Structural Engineering, 2013,99(17):346-347.
- [13] Furlanetto G, Torricelli L F, Marchiondelli A. Design solutions for widening the A1-A9-A14 Italian highways [J]. Structural Engineering International, 2008, 18(4):356-364.
- [14] 连 军,贾 磊,徐艳玲. 连接刚度对加宽桥梁荷载横向分布的影响分析[J]. 公路,2013(7):143-146.
- [15] Wang Peng, Hu Wenhua, Zhang Changqing. Method to analyze the effect of concrete shrinkage and creep on widened T-beam bridges [C]//International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City. IEEE, 2015:511-514.
- [16] Shi X F, Li X X, Ruan X. Analysis of structural behaviour in widened concrete box girder bridges [J]. International Association for Bridge and Structural Engineering, 2008,18(4):351-355.
- [17] Tu Bing, Fang Zhi, Dong You, et al. Time-variant reliability analysis of widened deteriorating prestressed concrete bridges considering shrinkage and creep[J]. Engineering Structures, 2017,153:1-16.
- [18] Hosseini M, Jefferson A D. Time-dependent behaviour of widened reinforced concrete under-bridge[J]. Materials & Structures, 1998,31(10):714-719.
- [19] Neville A M, Dilger W H, Brooks J J. Creep of plain and structural concrete [M]. London and New York: Construction Press, 1983.
- [20] Kovler K. Interdependence of creep and shrinkage for concrete under tension[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995,7(2):96-101.
- [21] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.

(上接第 162 页)

- [6] Wang Zhe, Zhang Kaiwei, Wei Gang, et al. Field measurement analysis of the influence of double shield tunnel construction on reinforced bridge[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,81:252-264.
- [7] Zhu Lei, Liang Chengcheng. Safety assessment of tunnel shield construction for existing adjacent bridges [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022:3275073.
- [8] 周 鑫,杨建辉,刘 涛. 盾构法施工对近距离侧穿桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(2):586-595.
- [9] 张 恒,陈寿根,邓稀肥. 盾构法施工对地表及桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(3):552-557.
- [10] 宋慧林. 地铁隧道侧穿既有桥梁桩基影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- [11] 黄 戡,孙逸玮,杨伟军,等. 基于渗流应力耦合的盾构隧道开挖对邻近桥梁桩基的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):983-993.
- [12] 刘仁鹏,刘方京. 泥水加压盾构技术综述[J]. 世界隧道,2000(6):1-5,41.
- [13] 孙雪兵. 盾构隧道下穿施工对邻近铁路桥梁的影响分析[J]. 铁道建筑,2018,58(4):73-77.
- [14] 李 彪. 盾构隧道施工对地层及邻近桥梁桩基的影响研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [15] 公路养护技术规范:JTG H10—2009[S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [16] 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.