

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230425001

文章编号:1674-599X(2023)03-0074-10

引用格式:周建光,朱新胜,张鹏,等.盾构掘进速度对既有桩体切削变形规律研究[J].交通科学与工程,2023,39(3):74-83.

Citation:ZHOU Jianguang, ZHU Xinsheng, ZHANG Peng, et al. Research on the influence of shield tunneling speed on the deformation of shield cutting pile foundation[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(3): 74-83.

盾构掘进速度对既有桩体切削变形规律的研究

周建光¹,朱新胜²,张鹏²,方忠强³

(1.苏州交投规划设计建设管理有限公司,江苏 苏州 215000;

2.南京智慧岩土工程技术研究院,江苏 南京 211816;

3.华设设计集团股份有限公司,江苏 南京 210014)

摘 要:盾构隧道施工在其推进过程中不可避免地要穿越地下桩,这是当前盾构隧道施工中的难点问题之一。为保证在隧道工程中盾构机切削地下桩基的施工安全和掘进效率,探究不同掘进参数下桩体的变形规律,采用PFC^{3D}颗粒流软件,模拟在不同掘进速度下盾构切削桩基的施工过程,分析和研究在不同掘进参数下桩体沿盾构掘进方向、垂直盾构掘进方向的桩体变形和桩顶竖向沉降的变化规律。并依托江苏省苏州市桐泾路北延隧道工程进行实证分析。研究结果表明:桩体的变形主要发生在桩体与盾构机上部相交的交点至该点往上的11倍桩径范围内。当盾构机推进速度不超过15 mm/min,刀盘转速不超过2.0 r/min时,桩体沿垂直盾构掘进方向的变形大于沿盾构掘进方向的变形;反之,当盾构机推进速度超过15 mm/min,刀盘转速超过2.0 r/min时,桩体沿垂直盾构掘进方向的变形小于沿盾构掘进方向的变形。因此,当盾构机分别切削桩长为20、40 m的桩底,或者切削桩长为40 m的桩身时,其推进速度不应超过10 mm/min,刀盘转速不应超过1.0 r/min;当盾构机切削桩长为20 m桩身时,应控制其推进速度为1~5 mm/min,刀盘转速为0.5~1.0 r/min。

关键词:PFC颗粒流;盾构施工;切削桩基;掘进参数;桩体变形

中图分类号:U45

文献标志码:A

Research on the influence of shield tunneling speed on the deformation of shield cutting pile foundation

ZHOU Jianguang¹, ZHU Xinsheng², ZHANG Peng², FANG Zhongqiang³

(1. Suzhou Transport Investment Planning Design and Management Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

2. Institution of Nanjing Intelligent Geotechnical Engineering, Nanjing 211816, China;

3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: During the construction of shield tunnels, it is inevitable to cross underground piles, which is one of the difficulties in current shield tunnel construction. In order to ensure the safety and excavation efficiency of shield tunnel construction when cutting through underground piles, this study explores the deformation characteristics of shield cutting piles under different excavation parameters. PFC^{3D} software is used to simulate the construction process of shield cutting piles at different excavation speeds, and the deformation characteristics of the piles along the shield excavation direction, the vertical shield excavation direction, and the vertical settlement of the pile top are analyzed and studied under different excavation parameters. Taking the Tongjing Road North Extension Tunnel Project in Suzhou City, Jiangsu Province as an example, an analysis and study are conducted. The research results show that the deformation of the piles mainly occurs within 11 times the diameter of the shield cutting pile. When the advancement speed does not exceed 15 mm/min and the cutterhead rotation

收稿日期:2023-04-25

作者简介:周建光(1971—),男,苏州交投规划设计建设管理有限公司高级工程师。

speed does not exceed 2.0 r/min, the deformation along the vertical excavation direction is greater than the deformation along the excavation direction. Conversely, the deformation along the vertical excavation direction is smaller than the deformation along the excavation direction. Therefore, when the shield cutting pile has a length of 20 or 40 meters at the pile bottom, or a cutting pile length of 40 meters at the pile body, the advancement speed should not exceed 10 mm/min, and the cutterhead rotation speed should not exceed 1.0 r/min. When the shield cutting pile has a length of 20 meters at the pile body, the advancement speed should be controlled within the range of 1-5 mm/min, and the cutterhead rotation speed should be controlled within the range of 0.5-1.0 r/min.

Key words: PFC particle flow; shield; cutting the pile foundation; tunnelling parameters; pile deformation

盾构隧道施工在其推进过程中会频繁地遇到穿越地下桩基础的情况。这种情况不仅会严重影响掘进速度和施工安全,还可能对上部结构或者建筑物造成破坏。这是当前盾构隧道施工中的难点问题^[1-3]之一。如何既保证盾构切割桩基施工安全,又提高掘进效率是目前相关研究的热点之一。

在盾构隧道施工过程中,调整掘进参数不仅是控制桩体变形的最主要手段,工程的施工进度也会直接受其影响。唐仁等^[4]以广州市某盾构下穿住宅楼工程为背景,结合理论计算、有限元分析、实测数据,研究了盾构隧道施工直接切桩,通过住宅楼后剩余基桩的沉降及承载力计算问题。张厚美等^[5-7]通过理论分析和现场试验,系统地研究了在盾构切削混凝土桩基过程中,掘进参数的变化和影响。张磊^[8]研究了桩基在水平荷载下的受力情况及计算方法。JENCK等^[9-11]学者针对盾构施工的不同工况,分析了盾构掘进参数对地表和周边建筑物变形的影响。

此外,许多学者从数值计算的角度探究了盾构切削桩基对周边环境的影响。王禹棕等^[12-14]运用PFC^{3D}颗粒流软件,对盾构切割玻璃纤维增强塑料(glass-fiber reinforced plastic, GFRP)围护桩的施工掘进过程进行了研究。韩旭等^[15]联合采用FLAC^{3D}颗粒流软件和PFC^{3D}有限差分软件,分析了盾构切削GFRP筋混凝土围护桩的施工全过程及不同切桩参数对施工的影响。傅金阳等^[16]基于离散元-有限差分多尺度耦合分析方法,模拟了盾构掘进的动态过程,提出了一种土压平衡的盾构开挖面稳定性评价方法。赵宏华等^[17-18]采用三维有限元数值计算模型,研究了盾构施工对不同直径的单桩、侧边群桩变形的影响。张恒^[19]运用PFC^{3D}有限差分软件模拟

了盾构隧道开挖的全过程,对施工产生的地表沉降及桥梁桩基的侧向变形进行了分析和预测。在针对盾构直接切桩过程中,对桩体变形、受力分析的研究较为鲜见。针对在不同掘进参数下,当盾构切削桩基时,桩体的三维变形规律也有待进一步研究。

本研究依托苏州市桐泾路北延隧道工程,采用PFC^{3D}颗粒流软件,建立盾构切割混凝土方桩的三维数值模型,模拟和研究在不同掘进参数(刀盘转速、推进速度)下,当盾构机切削桩基时,桩体沿盾构掘进方向、垂直盾构掘进方向的变形和桩顶竖向沉降的变化规律。

1 工程概况

苏州市桐泾路北延隧道是苏州市构建的中心城区“七纵五横”路网框架中的主干路之一。该项目起于西塘河南岸,向南依次下穿清塘路、山塘河、沪宁城际铁路高架等,止于西园路与桐泾北路的交叉口。该主干路全长为2.1 km,隧道长为1.6 km。按照城市主干路标准对其进行设计,其设计速度为60 km/h。在该项目的隧道施工中,盾构穿越的地层主要为:粉砂、粉质黏土、黏土。该隧道上部主要为粉砂和粉土地层,透水性较大。地下水的主要类型为第四系孔隙潜水、微承压水、承压水,地下水位较高。

在桐泾路穿越北环快速路至盾构接收井之间的路面建筑为一废旧停车场,该停车场在20世纪90年代曾是苏州净化设备厂用地。历史资料显示:该厂的9#、11#、13#、14#、18#、49#、60#共7栋建筑与该盾

构隧道平面交叉,如图1所示。这些楼栋的主要建筑结构为砖木、砖混结构,均采用钢筋混凝土方桩作为地基。这些方桩横断面大小为35 cm×35 cm,桩长为9~25 m,埋深为2.5~3.5 m,混凝土强度等级为C30。据不完全统计,至少有180根方桩侵入了盾构隧道。

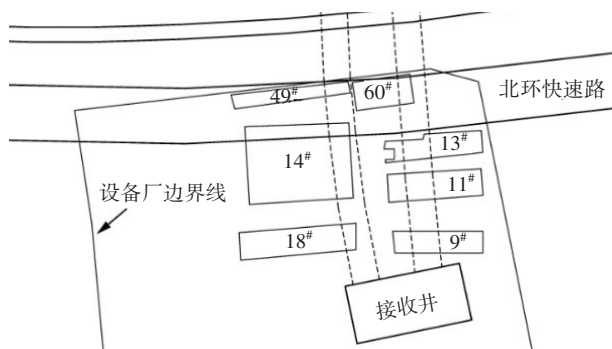


图1 建筑桩基分布平面图

Fig. 1 Construction pile foundation distribution plan

苏州市桐泾路北延隧道工程采用气压复合式泥水平衡盾构机进行施工。该盾构机长为87 m,总功率为3 500 kW,额定扭矩为22 520 kN·m,最大推力为191 313 kN,盾构机刀盘外径为13.67 m,管片外径为13.25 m,管片内径为12.05 m,分别采用C50、P12钢筋混凝土预制管片,其环宽为2.00 m。刀具配置主要为:中心鱼尾刀1把,切刀92把,先行刀40把,超挖刀2把。盾构机的刀盘配置如图2所示。

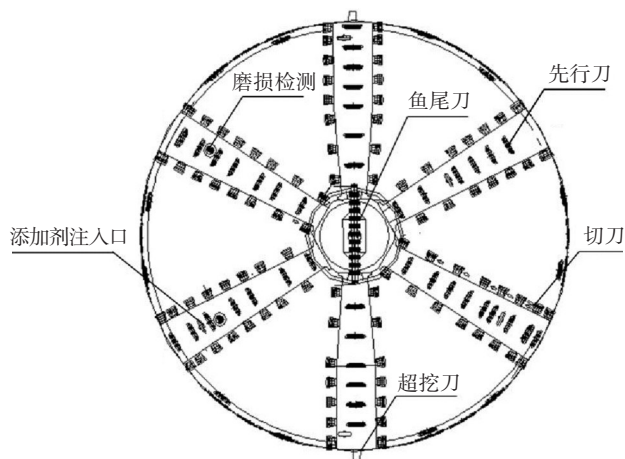


图2 盾构机刀盘配置

Fig. 2 Cutter head configuration of shield machine

2 计算模型与参数

2.1 基本假定

采用PFC^{3D}颗粒流软件,建立盾构施工切割混

凝土方桩的三维模型。PFC^{3D}颗粒流软件适用于对岩体或胶结材料的非均质性、不连续、大变形的分析。为简化计算,对盾构施工切割混凝土方桩的三维颗粒流模型作出以下假设:①桩基为均质的弹性体,暂不考虑桩基中钢筋的存在;②桩基顶端受到固定约束,其余部分受到地层的弹性抗力约束;③地层的土压力为静止土压力。在盾构掘进过程中,地层压力和土舱压力保持平衡;④在盾构推进过程中,盾构机始终保持一定的推进速度,其刀盘与隧道内的桩基紧密接触。

2.2 参数选取

通过单轴压缩试验,对苏州市桐泾路北延隧道实际工程中的混凝土方桩参数进行标定,结果分别见表1。

表1 宏观力学参数

Table 1 Macro mechanical parameters

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	摩擦因数
2 450	31.5	25.0	2.5	0.2

采用PFC^{3D}颗粒流软件,建立单轴压缩颗粒流模型,对该盾构掘进过程进行拟合,探究细观参数对岩石材料宏观力学响应的影响规律,得到本次模拟试验的正向黏结强度、切向黏结强度等细观力学参数,见表2。

表2 细观力学参数

Table 2 Meso-mechanical parameters

正向黏结强度/ (kN·mm ⁻¹)	切向黏结强度/ (kN·mm ⁻¹)	正向与切向黏结 强度之比	摩擦因数
1×10 ⁷	1×10 ⁷	1	0.2

方桩在地下的围压主要是由地层静止土压力造成的,其与天然地基土自重应力状态一致。静止土压力的计算公式为:

$$\sigma = k_0 \gamma z \quad (1)$$

式中: σ 为地层某一深度的静止土压力; k_0 为静止土压力系数,取为0.5; γ 为地层重度,取为19 kN/m³。

2.3 模型建立

方桩模型与实际桩体的比例为1:1,方桩模型的横断面大小为35 cm×35 cm。考虑计算的可行性与效率,将桩体颗粒半径设为29~31 mm,颗粒密度设为2 450 kg/m³。因此,桩长为40 m桩体的颗粒总

数为35 490个。

由于该项目所处的地层较软,盾构机的刀具以切刀为主,故只考虑切刀对桩基的影响。切刀模型与实际切刀比例为1:1。采用PFC^{3D}颗粒流软件的wall create命令,创建6组切刀模型,共92把切刀,将切割混凝土方桩的所有刀具布置成以同心圆方式排列的刀盘,该刀盘直径为13.67 m。因此,相同高度的切刀在切割混凝土方桩某个部位时的运动轨迹均为圆形。

2.4 桩体变形和受力监测

通过PFC^{3D}颗粒流软件的ball.disp命令,监测在隧道不同深度处桩体沿盾构掘进方向、垂直盾构掘进方向的变形和桩顶的竖向沉降。通过PFC^{3D}颗粒流软件的ball.force.contact和ball.moment.contact命令,分别监测在隧道不同深度处桩体的受力情况和弯矩。桩体的变形和受力监测如图3所示。

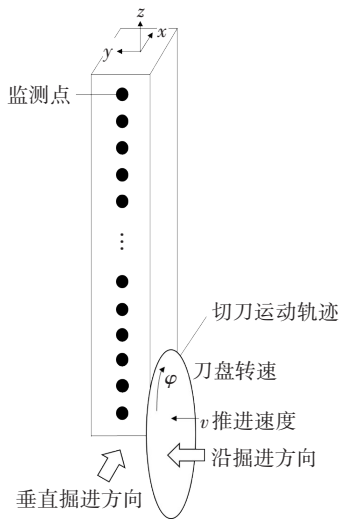


图3 桩体变形和受力监测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pile foundation deformation and stress monitoring

3 模拟结果分析

3.1 计算方案

设每个刀片绕y轴旋转的速度为 φ ,每个刀片沿y轴正方向的推进速度为v。由于盾构机推挤桩体可能使桩体产生横向位移,故将刀片贯入深度设为50 cm,该贯入深度略大于桩体宽度。根据贯入深度和掘进速度的比值确定模型的计算时间。

目前,盾构掘进的最快速度约为90 mm/min。

为探讨不同掘进速度对既有桩体变形的影响,本研究分别设定1、5、10、15、20、30、50、100 mm/min共8种推进速度。盾构机的刀盘转速与推进速度通常呈正比关系^[20-22]。因此,对应这8种推进速度设计了8种刀盘转速。数值试验的盾构推进速度和对应的刀盘转速见表3。

表3 盾构切割桩基的工况

Table 3 Working conditions of shield cutting pile foundation

工况	推进速度/ (mm·min ⁻¹)	刀盘转速/ (r·min ⁻¹)
1	1	0.5
2	5	1.0
3	10	1.5
4	15	2.0
5	20	2.5
6	30	3.0
7	50	3.5
8	100	4.0

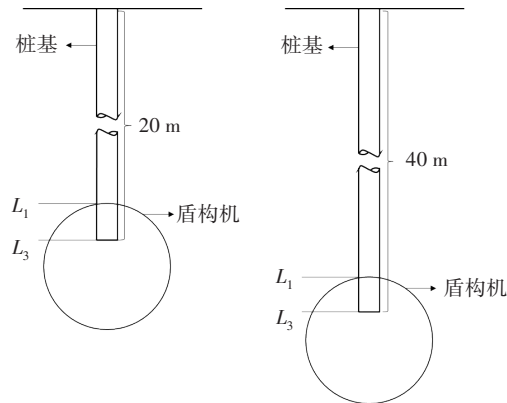
考虑到盾构机对方桩的不同切削方式,该试验在两种模式下进行:

1) 对桩基底端的切削(模型1)。

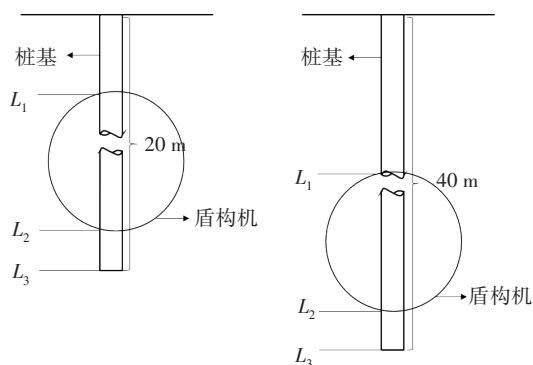
盾构机分别切割桩长(桩身在土层和岩层里的总长度)为20、40 m的桩基的底端,该模型如图4(a)所示。在图4(a)中,桩基底端在盾构机的底端范围内, L_1 是桩基与盾构机的上部交点, L_3 是桩基的底部端点。

2) 对桩身的切削(模型2)。

盾构机分别切割桩长为20、40 m的桩身,该模型如图4(b)所示。在图4(b)中,桩基底端伸入盾构底端以下, L_1 是桩基与盾构机的上部交点, L_2 是桩基与盾构机的下部交点, L_3 是桩基的底部端点。



(a) 模型1:盾构机切割桩底



(b) 模型2:盾构机切割桩身

图4 盾构机切割桩基的两种模式

Fig. 4 Two modes of shield cutting pile foundation

3.2 盾构机切割桩底

为探究盾构机切割桩底对桩体变形的影响,采用图4(a)的模型1来模拟盾构机切割桩长分别为20、40 m的桩基情况。

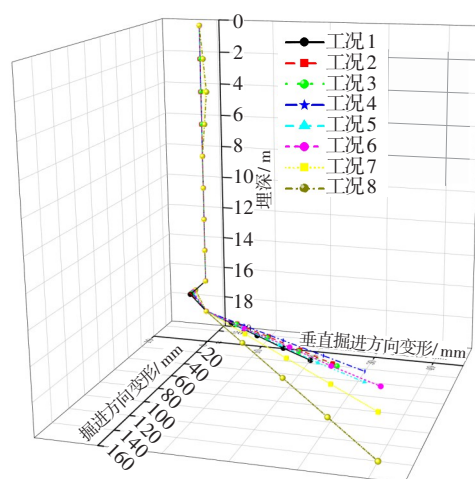
3.2.1 盾构机切割桩底变形分析

从桩体径向矢量变形和桩体径向受力两个角度来分析当盾构机切割桩底时桩体的变形情况。桩体径向的矢量变形如图5所示。

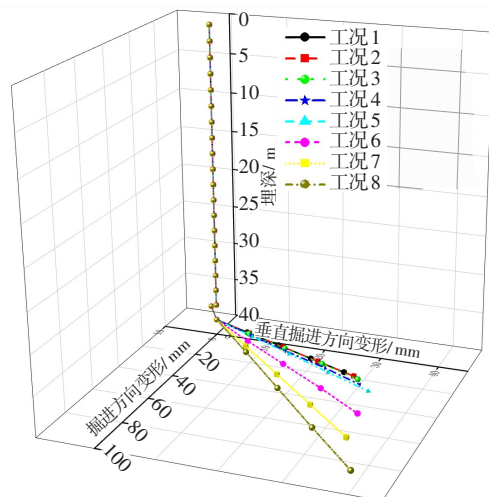
从图5可看出:

1) 桩体沿盾构掘进方向和垂直盾构掘进方向的变形主要发生在盾构切割桩体处(L_1 点)以上11倍桩径范围内的桩体上。当盾构机切割桩长为20 m的长桩体时,在不同掘进参数下,桩体的径向矢量变形主要发生在16~20 m的埋深处。当盾构机切割桩长为40 m的长桩体时,在不同掘进参数下,桩体的径向矢量变形主要发生在36~40 m的埋深处。桩体变形部分的长度约为4 m,方桩横截面的边长为35 cm,桩体变形部分的长径比约为11:1。因此,在不同掘进参数下,桩体的径向矢量变形主要发生在盾构机切割桩体处以上11倍桩径范围内的桩体上。

2) 当盾构推进速度和刀盘转速较小时,桩体主要以沿垂直盾构掘进方向的变形为主;当盾构推进速度和刀盘转速较大时,桩体主要以沿盾构掘进方向的变形为主。当盾构推进速度不超过15 mm/min,刀盘转速不超过2.0 r/min时,桩体沿垂直盾构掘进方向的变形大于桩体沿盾构掘进方向的变形;而当盾构推进速度大于等于20 mm/min,刀盘转速大于等于2.5 r/min时,桩体沿盾构掘进方向的变形大于桩体沿垂直盾构掘进方向的变形。



(a) 当盾构机切割桩长为20 m的桩底时的桩体变形图



(b) 当盾构机切割桩长为40 m桩底时的桩体变形图

图5 盾构切割桩底时桩体变形图

Fig. 5 Shield cutting deformation diagram of pile body when cutting pile bottom

3.2.2 盾构机切割桩底桩体最大变形

当盾构机切割桩底时,不同桩长的桩顶沉降量和最大变形分别如图6~7所示。

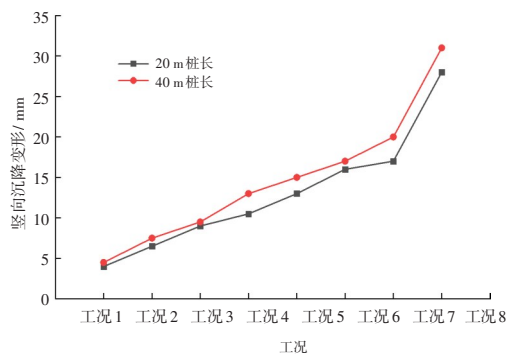


图6 当盾构机构切割桩底时,不同桩长的桩顶沉降量

Fig. 6 Settlement amount of pile top with different pile lengths when shield cutting pile base end

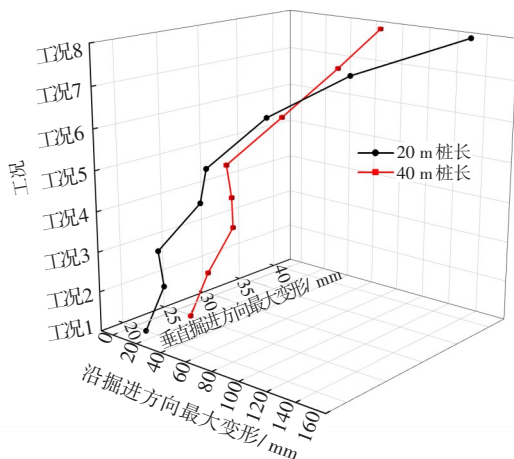


图7 当盾构机切削桩底时,不同桩长的桩体最大变形

Fig. 7 Maximum deformation of pile when shield cutting pile base end

从图6~7可以看出:

1) 当盾构机切削桩体的桩底时,桩顶的沉降量随盾构推进速度和刀盘转速的提高而逐渐变大。在相同的掘进参数下,桩体越长,桩顶的沉降量越小。这是由于随着桩体长度的增加,周围土体所产生的围压对桩体的约束作用也在逐渐增强,且桩体自身的柔性也在缓慢增大。

2) 当盾构推进速度为 10 mm/min,刀盘转速为 1.5 r/min时,20 m 桩体的桩顶的沉降量突然急速增加。当盾构推进速度为 50 mm/min,刀盘转速为 3.5 r/min时,20 m 桩体的桩顶的沉降量再次急速增加。因此,盾构机切割桩基的推进速度和刀盘转速均不宜过大,应尽量保持稳定,避免引起沉降速度突变,减少对桩体造成冲击和扰动。

3) 桩体沿垂直盾构掘进方向的最大变形随盾构机的推进速度、刀盘转速的增加而缓慢增大;桩体沿盾构掘进方向的最大变形随盾构机的推进速度、刀盘转速的增加而快速增大。

3.2.3 盾构切削桩底时受力分析

当盾构机切削桩体的桩底时,桩体所受最大切削力如图8所示。从图8可以看出,桩体沿垂直盾构掘进方向所受的最大切削力随盾构推进速度、刀盘转速的提高而缓慢增大;桩体沿盾构掘进方向所受的最大切削力随盾构推进速度、刀盘转速的提高而迅速增大。当盾构推进速度小于 15 mm/min、刀盘转速小于 2.0 r/min时,桩体沿盾构掘进方向所受

的切削力小于桩体沿垂直盾构掘进方向的切削力。当盾构掘进速度大于等于 20 mm/min,刀盘转速大于等于 2.5 r/min时,桩体沿盾构掘进方向的切削力大于桩体沿垂直盾构掘进方向所受的切削力。

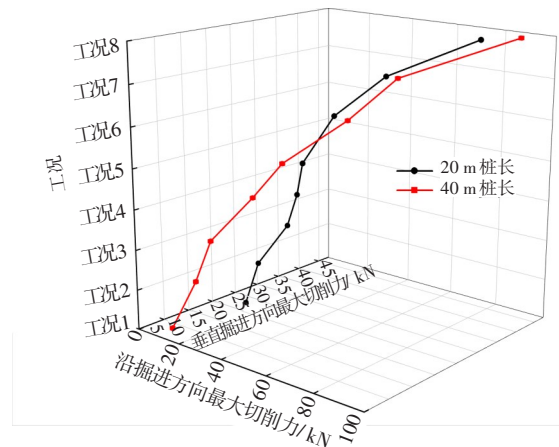


图8 盾构切削桩底时桩体所受最大切削力

Fig. 8 Maximum cutting force of pile body when shield cuts pile bottom

因此,桩体径向最大切削力的变化规律与桩体径向最大变形的变化规律基本一致。当盾构推进速度和刀盘转速较小时,桩体主要受沿盾构垂直掘进方向的切削力;当盾构推进速度和刀盘转速均较大时,桩体主要受沿盾构掘进方向的切削力。

3.3 盾构切削桩身

为探究盾构机切削桩身对桩体变形的影响,采用图4(b)的模型2来计算盾构机切削两种不同桩长的桩身的情况:①盾构机切削桩长为 20 m 的桩身时,盾构机顶端位于 12 m 的埋深处;②盾构机切割桩长为 40 m 桩身时,盾构机顶端位于 32 m 的埋深处。

3.3.1 盾构机切削桩身变形分析

当盾构机切削桩体的桩身位置时,不同桩长的桩顶沉降量如图9所示,桩体的最大变形如图10所示。

从图9~10可看出:

1) 与盾构掘进参数对径向矢量变形的影响相比,这些参数对桩顶竖向沉降的影响相对较小。当桩长相同时,在同一掘进参数下,桩顶的竖向沉降量始终小于桩体的径向矢量变形量。

2) 当盾构机切削桩身时, L_1 点上部桩体的变形规律与当盾构机切削桩底时,桩体的变形规律类似。桩体沿盾构垂直掘进方向的最大变形随盾构

机的推进速度、刀盘转速的提高而缓慢增大;桩体沿盾构掘进方向的最大变形随盾构推进速度、刀盘转速的提高而迅速增大。当桩长相同时,在同一掘进参数下,当盾构机切削桩身时的桩体最大变形量始终大于盾构机切削桩底时的桩体最大变形量。

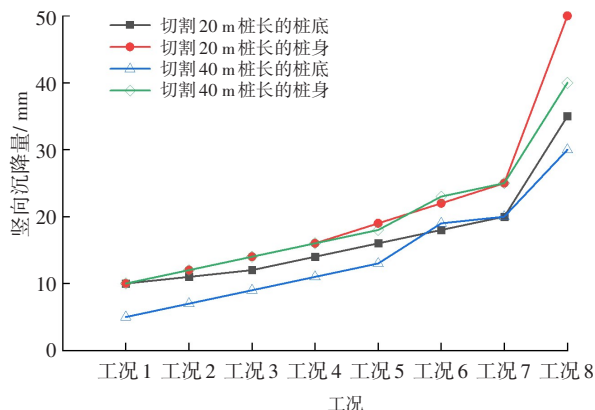


图9 当盾构机构切削桩身时,不同桩长的桩顶沉降量
Fig. 9 Settlement amount of pile top with different pile lengths when shield cuts pile positions

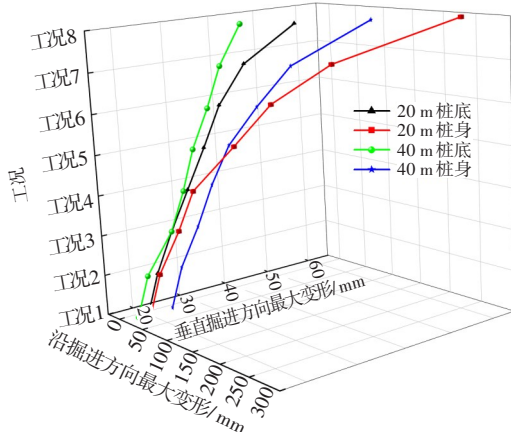


图10 当盾构机切削桩身的不同位置时,桩体的最大变形
Fig. 10 Maximum deformation of pile when shield cuts different pile positions

3.3.2 盾构切削桩身受力分析

当盾构机切削桩身的不同位置时,桩体所受的最大切削力如图11所示。从图11可看出:

1) 当盾构机切割桩身时,桩身所受的最大切削力的变化规律与当盾构机切割桩底时,桩身的变化规律基本一致。当盾构推进速度小于15 mm/min、刀盘转速小于2.0 r/min时,桩体沿盾构掘进方向所受的切削力小于其沿盾构垂直掘进方向所受的切削力。当盾构推进速度大于等于20 mm/min、刀盘转速大于等于2.5 r/min时,桩体沿盾构掘进方向所受的切削力大于其沿盾构垂直掘进方向所受的切削力。

2) 当桩长相同时,在同一掘进参数下,盾构机切割桩身时,桩体的最大切削力始终大于当盾构机切割桩底时桩体的最大切削力。这是由于当盾构机切割桩身时,刀盘与桩体的接触面积高于当盾构机切割桩底时的,盾构机切割桩身的刀具数量也大于盾构机切割桩底的刀具数量。

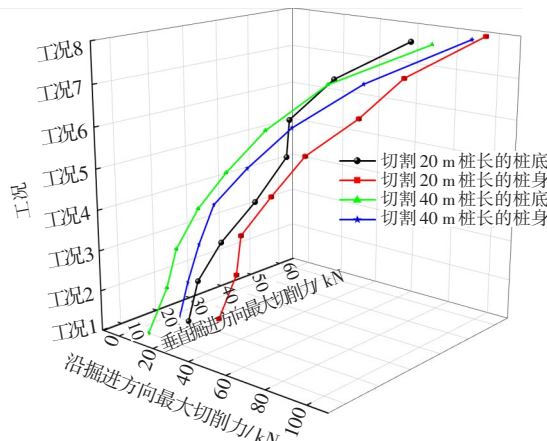


图11 盾构切削不同桩身位置时桩体所受最大切削力
Fig. 11 The maximum cutting force on the pile body when the shield cuts different pile positions

4 讨论与分析

保持桩体稳定是盾构施工最基本的要求。可以通过判断在不同掘进参数下桩体的最大径向矢量变形、最大弯矩和桩顶的最大竖向沉降是否满足相关规范来综合确定盾构掘进参数的最优值。

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)(简称为规范1)中对桩体的要求,桩体的垂直度斜率不得超过1%;若后期桩体斜率的变化量不超过该值的15%,则在盾构机切削桩基的过程中,桩基所容许得最大径向矢量变形为桩基斜率的1.5‰。因此,根据桩体的斜率和埋深,可按规范1计算出桩体最大径向矢量变形。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB50911—2013)(简称为规范2)的要求,桩体的竖向位移的累计变化量应控制在25 mm以内。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(简称为规范3)的要求,桩体的极限抗弯承载力可由桩体的极限抗弯承载力矩形截面计算得到。因此,在本研究中,横截面边长为350 mm的方桩的极限抗弯承载力为107.2 kN/m²。

在不同掘进参数下,桩体的最大径向矢量变

形、最大竖向沉降和最大弯矩与规范值之比见表4。
工程实际盾构掘进参数见表5。

由表4可知:

- 1) 当桩长相同,盾构机切削桩身时,满足规范1~3对桩体的最大径向矢量变形、最大弯矩和桩顶的最大竖向沉降要求的盾构推进速度和刀盘转速均比当盾构机切削桩底时的盾构推进速度和刀盘转速小。当盾构机切削桩长为20 m的桩底时,工况3(盾构推进速度为10 mm/min、刀盘转速为1.5 r/min)的桩体的最大径向矢量变形、最大弯矩和桩顶的最大竖向沉降均能满足规范1~3要求。当盾构机切削桩长为20 m的桩身时,工况1(盾构推进速度为1 mm/min、刀盘转速为0.5 r/min)的桩体的最大径向矢量变形、最大弯矩和桩顶的最大竖向沉降也均能满足规范1~3的各项要求。
- 2) 若桩长越短,则满足规范1~3对桩体的最大径向矢量变形、最大弯矩和桩顶的最大竖向沉降要求的盾构推进速度和刀盘转速就越小。当盾构

机切削桩长为40 m的桩底时,工况4(盾构推进速度为15 mm/min、刀盘转速为2.0 r/min)的桩体的最大径向矢量变形、最大弯矩和桩顶的最大竖向沉降也均能满足规范1~3的各项要求。当盾构机切削桩长为20 m的桩底时,在工况4下(盾构推进速度为15 mm/min、刀盘转速为2.0 r/min),桩体的最大径向矢量变形超出了规范1的要求,其最大弯矩也超出了规范3的要求;但工况3(盾构推进速度为10 mm/min、刀盘转速为1.5 r/min)的桩体的最大径向矢量变形、最大弯矩和桩顶的最大竖向沉降均能满足规范1~3的各项要求。

3) 与盾构掘进参数对桩体径向矢量变形的影响相比,其对桩体竖向沉降的影响相对较小。即使在盾构推进速度和刀盘转速均较快的工况6(盾构推进速度为30 mm/min、刀盘转速为3.0 r/min)中,桩体的最大竖向沉降值仍能满足规范2的要求,但桩体的最大径向矢量变形则超出了规范1的要求。

表4 不同掘进参数下桩体的最大径向矢量变形、最大竖向沉降和最大弯矩与控制值之比

Table 4 Maximum radial vector deformation,maximum vertical settlement,ratio of maximum bending moment to control value of pile under different driving parameters

项目		工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7	工况8
最大径向 矢量变形 与规范值 之比	20 m 桩底	0.52	0.87	0.93	1.28	1.56	1.87	2.89	4.80
	40 m 桩底	0.24	0.29	0.57	0.67	0.74	0.99	1.16	1.51
	20 m 桩身	0.91	1.38	1.97	2.62	4.01	5.58	9.52	14.76
	40 m 桩身	0.37	0.62	0.80	0.81	1.25	2.01	2.81	4.15
最大竖向 沉降与规 范值之比	20 m 桩底	0.32	0.37	0.40	0.53	0.62	0.72	0.80	1.12
	40 m 桩底	0.28	0.32	0.37	0.41	0.46	0.64	0.68	1.26
	20 m 桩身	0.36	0.60	0.60	0.73	0.82	0.95	1.05	2.04
	40 m 桩身	0.44	0.55	0.56	0.68	0.73	0.88	1.05	1.66
最大弯矩 与规范值 之比	20 m 桩底	0.49	0.64	0.87	1.49	2.25	2.80	5.59	13.06
	40 m 桩底	0.30	0.50	0.71	0.91	1.67	3.00	4.46	8.75
	20 m 桩身	0.70	1.02	1.34	2.17	4.03	7.15	14.67	28.79
	40 m 桩身	0.27	0.35	0.97	0.98	2.48	5.28	9.94	20.95

表5 工程实际掘进参数分析

Table 5 Analysis of actual excavation parameters

桩号	推进速度/(mm·min ⁻¹)	刀盘转速/(r·min ⁻¹)	总推力/kN		扭矩/(MN·m)		轴线上方地表累计沉降量/mm	状态
			均值	最大值	均值	最大值		
7 [#]	10	1.2	56 132	68 900	2.4	3.67	-12.67	稳定
16 [#]	17	1.2	51 840	64 000	3.1	3.80	-12.28	稳定
25 [#]	18	1.2	55 068	78 450	2.8	4.32	-22.72	稳定

5 结论

针对苏州市桐泾路北延隧道工程在盾构机切削桩基中可能出现的风险,本研究采用PFC^{3D}颗粒流软件,构建了盾构切削横截面大小为35 cm×35 cm混凝土桩基的数值模型,分析了在不同掘进参数下,当盾构机切削桩基不同竖向位置和切削不同长度桩体时,桩基的变形和受力规律,得到结论:

1) 桩体沿盾构机掘进方向和垂直盾构掘进方向的变形主要发生在盾构切割桩体处(L_1 点)以上11倍桩径范围内的桩身上。当盾构推进速度不超过15 mm/min、刀盘转速不超过2.0 r/min时,桩体沿垂直盾构掘进方向的变形大于桩体沿盾构掘进方向的变形;当盾构机推进速度大于等于20 mm/min、刀盘转速大于等于2.5 r/min时,桩体沿盾构掘进方向的变形大于桩体沿垂直盾构掘进方向的变形。

2) 与盾构机对掘进参数对桩体径向向量变形的影响相比,其对桩体竖向沉降的影响较小。桩顶的沉降量随盾构掘进速度的增加而增大。当盾构掘进速度相同时,桩体越长,桩顶沉降量越小。

3) 当桩长相同时,在同一掘进参数下,盾构切削桩身的最大径向向量变形和最大竖向沉降始终大于盾构切割桩底的最大径向向量变形和最大竖向沉降。当盾构机切削桩身时,桩体承受的最大切削力始终大于当盾构切割桩底时桩体所承受的。

4) 本研究未考虑桩体配筋的影响,综合在不同掘进参数下桩体的变形、受力分析结果,故应保守估计盾构机的最大推进速度和刀盘转速。建议:当盾构机切削桩长为20 m的桩底时,应控制其推进速度不超过10 mm/min,刀盘转速不超过1.0 r/min。当盾构机切削桩长为20 m的桩身时,应控制其推进速度为1.0 mm/min为宜,最快不得超过5 mm/min;刀盘转速应控制在0.5 r/min为宜,最快不得超过1.0 r/min。当盾构切削桩长为40 m的桩底或桩身时,应控制其推进速度不得超过10 mm/min,刀盘转速应不超过1.0 r/min。

5) 本研究分析了在不同掘进速度下,盾构机切削桩体的情况,选用项目为20世纪90年代建设的苏州市净化设备厂搬迁后的废旧停车场。该研究可为类似工程提供参考。

参考文献(References):

[1] 廖晨,刘超,张子新,等.超大直径泥水盾构施工对相邻

单桩位移影响研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(4):1248-1257.

LIAO Chen, LIU Chao, ZHANG Zixin, et al. Investigation on the effect of large-diameter slurry shield tunneling on the deformation of adjacent single pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1248-1257.

[2] 李雪,周顺华,王培鑫,等.隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析[J].岩土力学,2015,36(S1):235-240.

LI Xue, ZHOU Shunhua, WANG Peixin, et al. Analysis of impact of isolation piles and shield tunnelling on adjacent high-speed railway pile foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 235-240.

[3] 周健,陆丽君,贾敏才.基于FLAC^{2D}数值方法的盾构隧道地层损失率研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(4):902-907.

ZHOU Jian, LU Lijun, JIA Mincai. Research of the strata loss rate of shield tunnel excavation based on FLAC^{2D} numerical method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 902-907.

[4] 唐仁,林本海,梁鹏.盾构下穿住宅楼直接切桩的安全性研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(S2):878-883.

TANG Ren, LIN Benhai, LIANG Peng. Study on the safety of shield passing through the residential building and directly cutting pile foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 878-883.

[5] 张厚美,吴秀国,曾伟华.土压平衡式盾构掘进试验及掘进数学模型研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S2):5762-5766.

ZHANG Houmei, WU Xiuguo, ZENG Weihua. Study on tunneling experiment and mathematical model of epb shield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5762-5766.

[6] 陈海丰,袁大军,王飞,等.盾构直接切削大直径桩基的掘削参数研究[J].土木工程学报,2016,49(10):103-109,128.

CHEN Haifeng, YUAN Dajun, WANG Fei, et al. Study on shield cutting parameters when cutting big diameter piles [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 103-109, 128.

[7] 杜闯东,张杰,唐纵雄.盾构直接切削桩基施工关键技术[J].隧道建设(中英文),2019,39(10):1666-1677.

DU Chuangdong, ZHANG Jie, TANG Zongxiong. Key technologies of shield direct cutting pile foundation [J].

- Tunnel Construction, 2019, 39(10): 1666-1677.
- [8] 张磊. 水平荷载作用下单桩性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- ZHANG Lei. Study on behavior of single pile under lateral loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [9] JENCK O, DIAS D. 3D finite difference analysis of the interaction between concrete building and shallow tunnelling[J]. Géotechnique, 2004, 54(8): 519-528.
- [10] KASPER T, MESCHKE G. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling[J]. Computers & Geotechnics, 2006, 33(4): 234-247.
- [11] 蒋宇卓, 曹鹏, 喻豪俊, 等. 砂卵石地层隧道开挖过程中上覆土体应力变化的颗粒流模拟研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(S2): 141-146.
- JIANG Yuzhuo, CAO Peng, YU Haojun, et al. Stress variations of overlying soil during tunnel excavation in sandy-cobble strata using particle flow code 2D [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S2): 141-146.
- [12] 王禹棕, 李继超, 廖少明. 深圳地铁9号线盾构切削群桩数值模拟与实测分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 192-199.
- WANG Yuliang, LI Jichao, LIAO Shaoming. Numerical simulation and measured data analysis of pile group cutting by shield: A case study of running tunnel on line No.9 of Shenzhen metro [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 192-199.
- [13] 刘军, 韩旭, 金鑫. 基于颗粒流原理的盾构切割GFRP钢筋混凝土围护桩机制[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S1): 32-37.
- LIU Jun, HAN Xu, JIN Xin. Mechanism of shield cutting GFRP reinforced concrete pile based on particle flow principle[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S1): 32-37.
- [14] 南志领. 三维地质力学模型试验中的盾构机—地层相似系统研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- NAN Zhiling. Research on shield machine-ground similar system in 3D geomechanical model test [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [15] 韩旭. 盾构接收掘进地质力学模型试验数值分析及切桩原理研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- HAN Xu. Numerical analysis of geomechanical model test and study of pile cutting principle for shield receiving tunneling [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [16] 傅金阳, 谢佳伟, 房雅楠, 等. EPB盾构开挖面稳定性的PFC-FLAC耦合分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 116-121.
- FU Jinyang, XIE Jiawei, FANG Yanan, et al. PFC-FLAC coupling analysis of face stability for EPB shield tunneling[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(5): 116-121.
- [17] 赵宏华, 陈国兴. 盾构掘进施工对群桩基础变形的动态影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 562-568.
- ZHAO Honghua, CHEN Guoxing. Research of the dynamic deformation influence of pile group induced by adjacent shield driving [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 562-568.
- [18] 赵宏华, 陈国兴. 盾构施工对自由单桩受力性状的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1219-1225.
- ZHAO Honghua, CHEN Guoxing. Influence of shield driving on free single pile load carrying capability [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1219-1225.
- [19] 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.
- ZHANG Heng, CHEN Shougen, DENG Xifei. Analysis on influence of shield tunneling on ground and bridge pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 552-557.
- [20] 张勇. 基于大数据的盾构机掘进参数研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- ZHANG Yong. Study on tunneling parameters of shield machine based on big data [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [21] 周璇. 盾构全断面切削穿越钢筋混凝土桩试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- ZHOU Xuan. Research on full face shield machine cutting and passing through reinforced concrete pile [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [22] 江新亮. 地铁盾构隧道下穿既有建筑物的影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- JIANG Xinliang. Study on influence of subway shield tunneling through existing buildings [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.

(责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:李岳林)