

DOI: 10.7672/sgjs2026020111

敏感地层双模盾构切桩下穿既有隧道变形控制*

康安帅¹, 余俊^{2,3,4}, 刘翼豪¹, 沈侃¹

(1. 中交(广州)建设有限公司, 广东 广州 511458; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 4. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040)

[摘要] 针对敏感地层中盾构切桩下穿施工易引起既有隧道变形开裂问题, 提出了局部隔墙+桩基加固保护隧道后盾构直接切桩通过的施工方案。采用规范法验证了方案的可行性, 并建立三维桩-土-隧道有限元模型分析了不同施工工况下隧道结构的应力和变形响应。根据土压-泥水双模盾构设备特点及地层特性提出了针对性的施工控制要点, 最终将隧道最大变形控制在5.9mm、稳定变形控制在4.5mm。

[关键词] 桩; 隧道; 盾构; 敏感地层; 切削; 变形; 数值模拟

[中图分类号] U455.43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0111-08

Deformation Control of Dual-mode Shield Cutting Pile Undercrossing Existing Tunnel in Sensitive Strata

KANG Anshuai¹, YU Jun^{2,3,4}, LIU Yihao¹, SHEN Kan¹

(1. China Communications (Guangzhou) Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China; 2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: To address the issue of deformation and cracking in existing road box culverts and tunnels caused by shield tunneling through piles in sensitive strata, a construction scheme of the shield directly cutting through the piles involving partial partition walls and pile foundation reinforcement for tunnel protection was proposed. The feasibility of this scheme was verified by the standard method, and a three-dimensional pile-soil-tunnel finite element model was established to analyze the stress and deformation responses of the tunnel structure under different construction conditions. Based on the characteristics of the earth pressure-balance slurry shield machine and the properties of the strata, targeted construction control points were proposed. Ultimately, the maximum tunnel deformation was controlled at 5.9mm, and the stable deformation was controlled at 4.5mm.

Keywords: piles; tunnels; shields; sensitive strata; cutting; deformation; simulation

0 引言

近年来相关领域学者对盾构切桩穿越建(构)筑物技术进行了一系列研究^[1-2]。蒋啸天等^[3]采用有限元法研究了大直径盾构切穿护岸抗滑桩对堤岸的扰动影响, 基于计算结果提出了严控推进速

度、仓压等施工参数以减小盾构推力对堤岸及桩体不利影响。杨志勇等^[4]针对盾构切削大直径主筋桩群的施工难点, 提出了“低推速、高转速、稳扭矩”的控制方式, 现场实践表明其控制方法切实有效。王德福^[5]依托海珠湾盾构隧道工程, 采用数值模拟方法研究了盾构滚刀切削桩基的作用机理, 并对刀间距、贯入度、刀盘转速等关键参数进行敏感性分析, 结果表明, 当滚刀间距较大或刀圈贯入度过小时, 滚刀切削桩基效果较好且利用率较高; 当贯入

* 中交第二航务工程局有限公司立项课题(JSKF-20220331-001)

[作者简介] 康安帅, 工程师, E-mail: 1490241324@qq.com

[通信作者] 余俊, 工程师, E-mail: jumyu@tju.edu.cn

[收稿日期] 2025-04-16

度增大时,滚刀切桩影响范围增大,有利于桩基材料的破坏剥落;贯入度与刀盘转速设置不当都会造成滚刀破桩荷载增大。吴滨源^[6]依托沈阳地铁 4 号线工程,对盾构机切桩刀具选型、刀具磨损规律、切桩过程中掘进参数波动和既有隧道变形规律开展了研究。吴志峰等^[7]通过模型试验研究了盾构切桩的可行性,验证了滚刀和切刀切桩性能及盾构切桩关键掘进控制参数,提出了“低推进速度、高转速”的磨桩方式,研究发现,滚刀对混凝土的切削效果较好,切刀对钢筋的切削效果较好,且混凝土强度越高,滚刀对钢筋的切割效应越好。张雨等^[8]则以大连地铁连续穿越钢筋混凝土灌注桩群为案例进行研究,提出了“小推力、低转速”的掘进方式,总结出滚刀环压切割、刮刀无序缠拉穿越钢筋混凝土排桩技术和钢筋混凝土破碎体渣土改良辅助输排技术。袁大军等^[9]、王飞等^[10]、刘浩^[11]以苏州轨道交通 2 号线盾构穿越广济桥桩基工程为依托,通过理论分析、数值模拟和现场试验研究了盾构切桩机理、刀具选型,形成了“慢推速、中转速、保土压、注惰浆、控姿态”的掘进控制理念。

针对双模盾构施工技术,林向阳等^[12]依托沈阳地铁 4 号线双模盾构施工案例,讨论了土压平衡模式和泥水平衡模式相互转换的关键技术,对比分析了 2 种模式的掘进效率和地层沉降控制效果,确定了具体地层的掘进模式。袁守谦等^[13]从盾构设备优化、掘进模式选择、掘进参数控制等方面,对双模盾构切桩下穿地下人行通道施工技术进行了研究。黄钟晖等^[14]以南宁市轨道交通 5 号线为施工案例进行研究,针对下穿浅基础建筑物及复合地层中地表沉降等风险,选用泥水-土压双模盾构机进行施工,通过盾构机针对性设计,根据实际工况通过模式转换选择适合的掘进模式,实现地表沉降的严格控制。

本文针对广州市轨道交通某区间下穿既有城市主干道隧道工程,提出了局部隔墙+抗拔桩保护隧道后盾构直接切削桩基通过的方案,采用规范法验算了该方案可行性。通过三维数值模型研究了不同工况下盾构施工对既有隧道产生的应力响应和变形扰动;提出了下穿施工控制要点,并对穿越过程中关键参数控制进行了研究。

1 工程概况

1.1 工程简介

广州市轨道交通某区间工程,左线长 1 351.406m,右线长 1 332.898m,隧道内径 5.8m、外径 6.4m,采用 2 台串联式土压-泥水双模盾构施工。

区间盾构隧道在里程 ZDK41+136.000—ZDK41+196.000, YDK41+158.000—YDK41+224.000 段下穿既有城市主干道行车隧道开口段 3、渐变段及标准闭口段,位置关系如图 1 所示,既有隧道结构尺寸如表 1 所示。

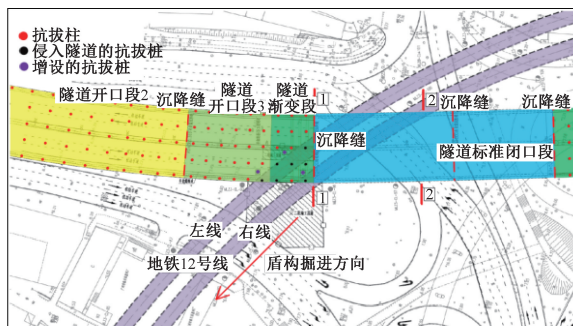


图 1 下穿范围位置关系平面

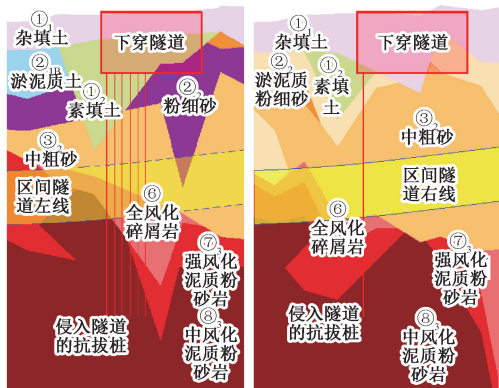
Fig. 1 The position relation plan in the undercrossing range

表 1 既有隧道结构尺寸

Table 1 Structural size of existing tunnel m

区段	断面尺寸(长×宽×高)	底板厚度	侧墙厚度
开口段	36.3×29.5×(5.5~6.9)	1	0.7
渐变段	18.3×29.5×6.9	1	0.7
闭口段	60.0×29.5×7.3	1	1.0

如图 2 所示,下穿既有隧道区域地层从上至下依次为①₁ 杂填土、①₂ 素填土、②_{1B} 淤泥质土、②₂ 淤泥质粉细砂、③₂ 中粗砂、⑥ 全风化碎屑岩、⑦₃ 强风化泥质粉砂岩及⑧₃ 中风化泥质粉砂岩。新建隧道主要穿越③₂ 中粗砂、⑥ 全风化碎屑岩、⑦₃ 强风化泥质粉砂岩层。



a 区间左线隧道与下穿隧道位置关系纵断面 b 区间右线隧道与下穿隧道位置关系纵断面

图 2 下穿区域地质断面

Fig. 2 Geological sections in undercrossing area

1.2 桩基概况

1) 基坑支护及基底加固情况。既有隧道采用 $\phi 500@1\ 000\text{mm}$ 搅拌桩对基底进行地层加固,围护

结构采用 $\phi 1\ 000$ 钻孔桩, 桩长 9.6~11.2m, 桩间采用 $\phi 600@400\text{mm}$ 旋喷桩后止水, 旋喷桩深入砂层以下 1m。

2) 既有隧道抗拔桩概况。隧道渐变段共有 15 根抗拔桩, 隧道开口段 3 共有 30 根抗拔桩, 桩基均为摩擦型钻孔灌注桩, 桩径 1m, 主筋采用 25 根 $\phi 28$ 钢筋, 螺旋箍筋采用 $\phi 10@150\text{mm}$, 加劲箍筋采用 $\phi 16@2\ 000\text{mm}$ 。每个横断面设置 5 根, 纵向间距 6m, 有效桩长 29.1m, 桩底标高 -27.500m, 桩底位于 ⑧₃ 中风化泥质粉砂岩, 原设计图纸中要求抗拔桩的抗拔力 $\geq 1\ 770\text{kN}$ 。

3) 既有隧道支撑概况。既有隧道在渐变段共设 3 根混凝土横向支撑, 截面尺寸为 0.6m \times 0.8m, 长 27.5m; 在横向支撑中间设置立柱, 共 3 根, 截面尺寸为 0.7m \times 0.8m, 高 5.3m; 在横向支撑间设置 1 根连系梁, 截面尺寸为 0.6m \times 0.7m, 长 6m。

4) 区间隧道与既有隧道干涉情况。根据设计图纸, 既有隧道有 6 根抗拔桩侵入左线隧道、1 根抗拔桩侵入右线隧道, 抗拔桩深入隧道以下 11.9m, 如图 3, 4 所示。

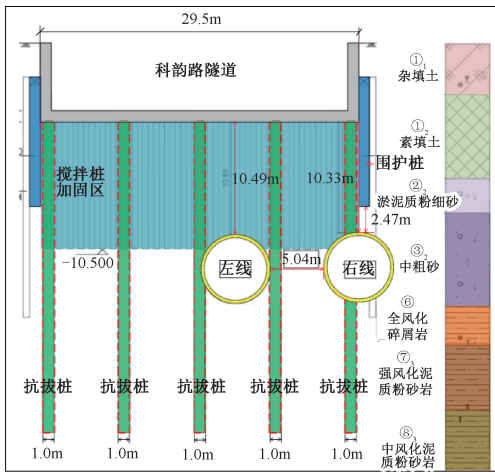


图 3 既有隧道渐变段与新建隧道位置关系

Fig. 3 The positional relationship between the transition section of the existing tunnel and the new tunnel

2 桩基处理方案

2.1 盾构穿越隧道方案

拟在隧道渐变段中间增设 1 道中隔墙, 并在隧道开口段 3 及渐变段西半幅新建 3 根抗拔桩后, 对侵入隧道的 7 根抗拔桩进行直接盾构切桩通过处理 (见图 5)。

2.2 结构抗浮验算

按最不利情况对既有隧道进行抗浮验算。既有抗拔桩桩径 1m、桩长 29.1m, 截断后的抗拔桩桩长约 10.8m, 认为截桩后有效桩长为 9.8m。新建抗

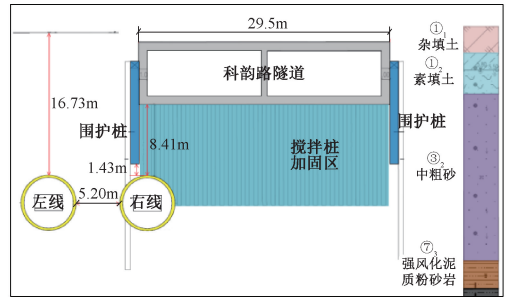


图 4 既有隧道闭口段与新建隧道位置关系

Fig. 4 The positional relationship between the closed section of the existing tunnel and the new tunnel

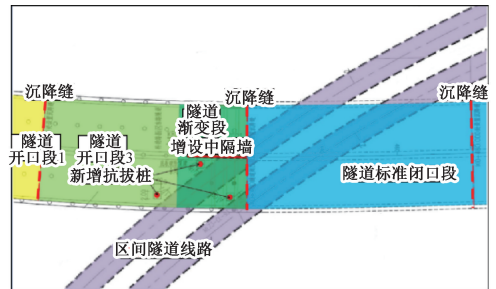


图 5 既有隧道改造平面布置

Fig. 5 Plan layout for the existing tunnel reconstruction

拔桩桩长为 31m、桩径为 1.2m。同时, 盾构施工前在隧道渐变段增设中隔墙, 有利于隧道抗浮。既有隧道改造后抗浮验算如图 6 所示。

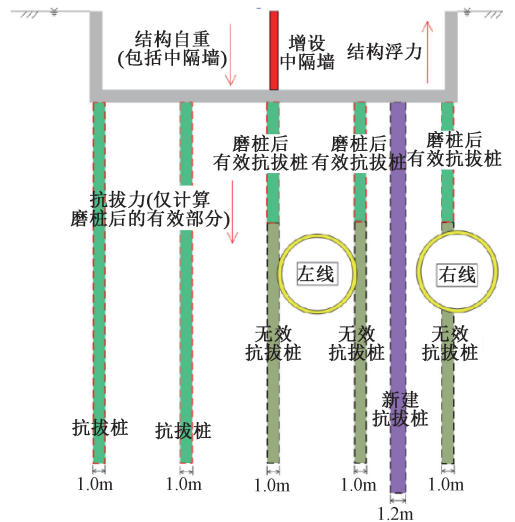


图 6 隧道改造后抗浮验算

Fig. 6 Anti-floating verification after tunnel reconstruction

根据 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》和 JGJ 476—2019《建筑工程抗浮技术标准》进行抗浮验算。

1) 隧道所受浮力计算:

$$v = 29.5 \times 5.8 \times (36.3 + 18.3) = 9\ 342\text{m}^3$$

$$F = \rho vg = 1\,000 \times 9\,342 \times 9.8 = 91\,552\text{kN}$$

2) 隧道及中隔墙所受重力计算:

$$G = 40.3 \times (36.3 + 18.3) \times 25 = 55\,010\text{kN}$$

3) 未截断的单根抗拔桩极限承载力标准值根据实际地层情况计算(参考《建筑桩基技术规范》):

$$T_{uk} = \sum \lambda_i q_{sik} u_i l_i \quad (1)$$

$$N_k \leq T_{uk}/2 + G_p \quad (2)$$

按表 2 计算得到单根抗拔桩抗拔力 $N_k = 1\,804\text{kN}$, 根据抗拔桩设计图纸要求, 单根抗拔桩抗拔力为 $1\,770\text{kN}$, 故在本次抗浮验算中抗拔桩抗拔力取较小值。

表 2 单根抗拔桩极限承载力标准值计算结果

Table 2 Calculation results for standard value of ultimate bearing capacity of a single anti-uplift pile

地层编号	厚度/m	q_{sik}/kPa	抗拔系数
② ₂	0.4	10	0
③ ₂	17.3	40	0.5
⑥	5.1	80	0.5
⑦ ₃	6.3	120	0.7

4) 根据表 3 计算得到截断后的单根抗拔桩抗拔力 $N_k = 411\text{kN}$ 。

表 3 截断后单根抗拔桩极限承载力标准值计算结果

Table 3 Calculation results for standard value of ultimate bearing capacity of a single anti-uplift pile after truncation

地层编号	厚度/m	q_{sik}/kPa	抗拔系数
② ₂	0.4	10	0
③ ₂	9.4	40	0.5
⑥	0.0	80	0.5
⑦ ₃	0.0	120	0.7

5) 根据表 4 计算得到新建单根抗拔桩抗拔力 $N_k = 2\,978\text{kN}$, 根据抗拔桩设计图纸要求, 单根新建抗拔桩抗拔力为 $2\,580\text{kN}$, 故在本次抗浮验算中新建抗拔桩抗拔力取较小值。

表 4 新建单根抗拔桩极限承载力标准值计算结果

Table 4 Calculation results for standard value of ultimate bearing capacity of a newly constructed single anti-uplift pile

地层编号	厚度/m	q_{sik}/kPa	抗拔系数
② ₂	0.4	10	0
③ ₂	17.3	40	0.5
⑥	5.1	80	0.5
⑦ ₃	8.2	120	0.7

6) 隧道整体抗浮计算。根据结构自重 G 和水浮力 F 计算得到截桩后的单根抗拔桩特征值为 411kN , 未截桩的单根抗拔桩特征值为 $1\,770\text{kN}$, 新建桩的单根抗拔桩特征值为 $2\,580\text{kN}$, 计算得抗浮

安全系数 $K = 1.451 > 1.1$, 满足隧道整体抗浮要求; 如考虑取消磨桩后抗拔桩抗拔力, 则抗浮安全系数 $K = 1.420 > 1.1$, 满足隧道整体抗浮要求。

3 盾构下穿影响分析

考虑盾构施工可能会导致既有隧道出现结构变形, 结合区间隧道盾构施工历程与结构特点, 以及与下穿隧道的空间位置关系, 针对盾构施工特点, 采用三维有限元软件模拟盾构施工对下穿隧道的不利影响, 重点分析隧道位移及受力情况。

3.1 三维数值模型建立

1) 模型简化。忽略实际地层空间变异性, 按邻近地质勘察探孔结果对地层进行简化, 根据下穿隧道竣工图资料建立三维有限元模型, 如图 7, 8 所示。

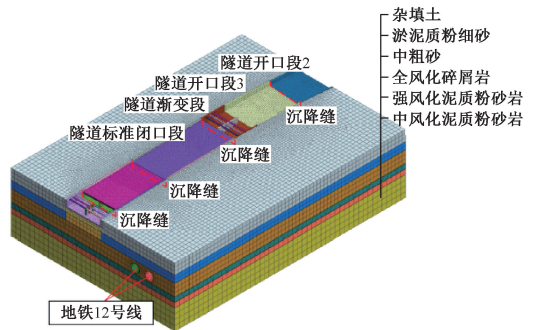


图 7 盾构隧道与既有隧道空间关系模型

Fig. 7 Spatial relationship model between shield tunnel and existing tunnel

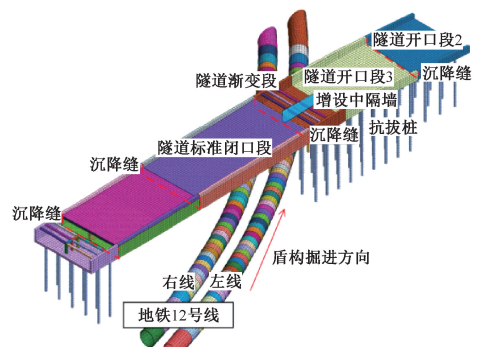


图 8 盾构隧道与既有隧道模型轴视图

Fig. 8 Axial view of the model between shield tunnel and existing tunnel

2) 边界条件。采用自动约束方式对模型底部 z 向、前后面 y 向及左右面 x 向施加约束。

3) 材料参数。土体材料采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 各地层土体参数如表 5 所示。隧道及桩基结构采用弹性本构模型, 结构参数如表 6 所示。

4) 施工工况及荷载。通过单元的钝化和激活模拟盾构开挖、管片拼装、壁后注浆等施工步序, 随施工步序逐步施加掘进压力和注浆压力等荷载。

表5 计算模型土体参数

Table 5 Soil parameters of the calculation model

地层编号	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
① ₁	16.5	8.0	10.0	20	0.36
② ₂	18.0	1.0	22.0	25	0.35
③ ₂	21.0	—	32.0	30	0.22
⑥	20.3	30.3	21.5	55	0.28
⑦ ₃	20.5	30.0	24.0	200	0.25
⑧ ₃	25.0	150.0	28.0	800	0.22

表6 计算模型结构参数

Table 6 Structural parameters of the calculation model

结构名称	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa
管片(C50)	0.2	25	34 500
抗拔桩(C35)	0.2	25	31 500
隧道结构(C30)	0.2	25	30 000

通过修改单元参数模拟注浆层浆液硬化。考虑隧道始发顺序,先施工右线隧道再施工左线隧道,直至左、右线盾构完全穿越既有隧道。在靠近既有隧道的重点影响区域,根据盾构隧道管片环宽及工效,设置单次掘进长度 3m。考虑远离隧道区域盾构施工对既有隧道变形影响较小,对于远离隧道重点影响区域,适当增大单次盾构掘进的长度以提高计算效率。盾构注浆压力取 0.35MPa,掌子面压力值为 0.21MPa。

3.2 计算结果及分析

3.2.1 位移模拟结果分析

主要工况下盾构施工诱发既有隧道位移如表 7 所示,既有隧道最大位移发展曲线如图 9 所示,既有隧道沿路面方向最大沉降发展曲线如图 10 所示。

表7 主要工况下盾构施工诱发既有隧道位移

Table 7 Displacement of the existing tunnel induced by shield construction under major conditions mm

工况	位移			总位移
	x 向	y 向	z 向	
6	0.3	0.1	0.0	0.3
16	1.0	0.3	0.1	1.0
26	1.2	0.4	1.4	1.5
36	1.2	0.6	3.0	3.1
46	1.3	0.9	3.2	3.4
56	1.5	1.0	3.3	3.5
66	1.5	1.0	3.3	3.5
76	1.7	1.1	3.3	3.6
86	2.1	1.2	3.4	3.7
96	2.4	1.2	4.4	4.7
106	2.4	1.4	5.2	5.5
116	2.5	1.3	5.3	5.7
126	2.6	1.5	5.3	5.8

盾构掘进诱发下穿隧道位移影响的三维模拟分析结果表明:①盾构掘进诱发下穿隧道最大 x 向

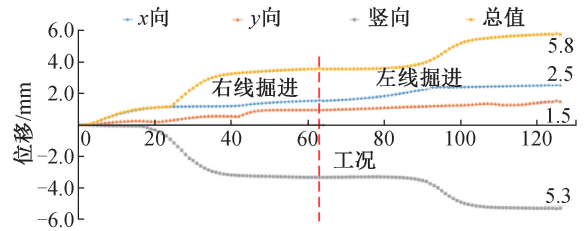


图9 既有隧道最大位移发展曲线

Fig. 9 The maximum displacement development curves of the existing tunnel

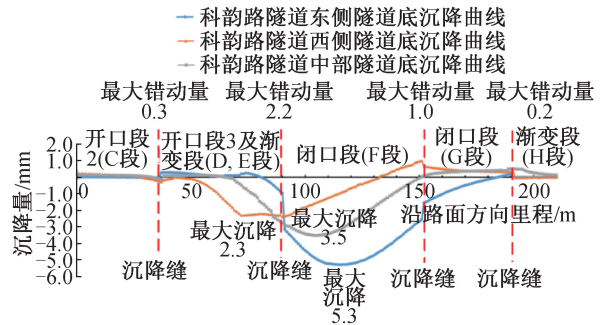


图10 既有隧道沿路面方向最大沉降发展曲线

Fig. 10 The maximum settlement development curves along the pavement for the existing tunnel

位移为 2.5mm,最大 y 向位移为 1.5mm,最大 z 向(竖向)位移为 5.3mm,最大总位移为 5.8mm,位于闭口段处;②盾构掘进过程中,沉降缝间最大错动量为 2.2mm,处于渐变段与闭口段之间。

3.2.2 内力模拟结果分析

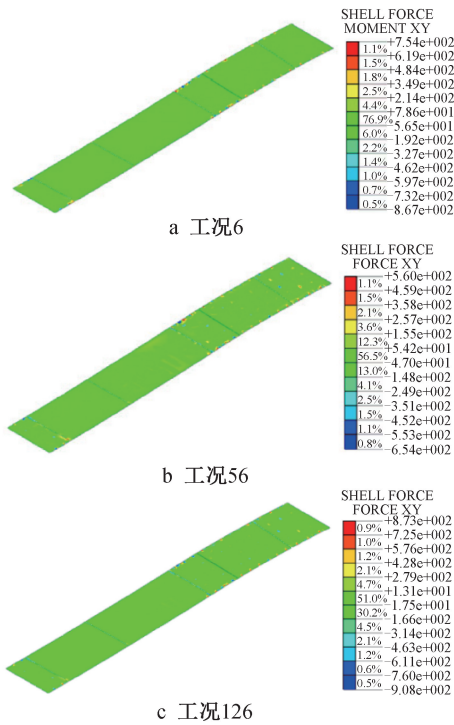
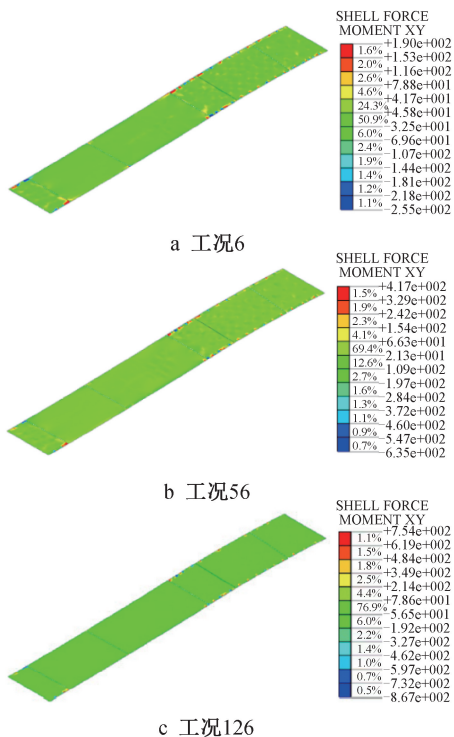
主要工况下既有隧道底板内力如表 8 所示,关键工况既有隧道内力云图如图 11,12 所示。

表8 主要工况下既有隧道底板内力

Table 8 Internal forces in the base slab of the existing tunnel under major conditions

工况	底板最		工况	底板最	
	大轴力/ kN	大弯矩/ (kN · m)		大轴力/ kN	大弯矩/ (kN · m)
6	186	255	76	587	454
16	212	166	86	584	525
26	250	183	96	621	625
36	354	318	106	807	794
46	590	600	116	867	754
56	654	635	126	908	867
66	591	432			

盾构掘进对既有隧道内力影响的三维模拟分析结果表明:①盾构掘进导致既有隧道最大弯矩为 867kN · m,发生在渐变段;②结合隧道结构配筋,采用理正工具箱验算,可得过程中出现的最大弯矩对应的裂缝宽度为 0.079mm < 0.2mm。

图 11 隧道底板轴力云图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)Fig. 11 Axial force in the tunnel base slab (unit: $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)图 12 隧道底板弯矩云图(单位: $(\text{kN} \cdot \text{m}) \cdot \text{m}^{-1}$)Fig. 12 Bending moment in the tunnel base slab (unit: $(\text{kN} \cdot \text{m}) \cdot \text{m}^{-1}$)

4 盾构切桩下穿施工控制

4.1 切桩施工控制要点

4.1.1 掘进模式选择

盾构下穿范围前半段穿越全断面③₂中粗砂地层,后半段开挖断面下部⑥全风化碎屑岩、⑦₃强风化泥质粉砂岩占比逐渐增多。根据前期盾构施工经验,采用泥水盾构模式可较好地控制砂层沉降,但在全、强风化地层中易出现滞排甚至结泥饼。因此对串联式盾构机进行改造,从螺旋机上外接管路至P21排泥泵,使得盾构机具备快速模式转换功能。当刀盘进入全断面③₂中粗砂地层后,切换至泥水盾构模式掘进,当泥浆参数明显变化、地层黏粒增加时可认为进入到⑥、⑦₃地层,此时可切换为土压盾构模式。

4.1.2 掘进参数控制

1) 试掘进参数总结。盾构下穿前总结类似地层掘进参数,切削桩体过程中,收集切削桩体的声音变化,每磨完第1根长桩后,及时总结掘进参数、既有隧道结构变形、地层变形等情况。

2) 参数控制理念。盾构磨桩期间,结合试验段掘进参数,采用小推力、低速、慢磨方式掘进,防止桩体发生偏移。

3) 渣样分析及响应。实际切削桩体过程中,及时进行渣土取样分析,若有钢筋和混凝土碎块,且刀盘扭矩未超过额定扭矩的80%,既有隧道变形在可控范围(实测值与结构安全控制指标值的比值 < 0.6),则继续推进,且收集渣土中的钢筋。

4) 渣土改良。掘进过程中通过盾构刀盘正面压入水、泡沫剂、膨润土等改良剂来改善开挖土体和易性,有助于碎桩块和钢筋从螺旋机顺利排除。在参数可控情况下尽量减少注水量,必要时注入浓泥浆进行渣土改良,使得排出渣土呈现相对较干状态,避免喷涌。

4.1.3 现场预警及应急

1) 参数及变形预警。刀盘推力上限控制在额定值的60%,刀盘扭矩控制在额定值的80%,隧道变形按最大设计允许变形的60%进行控制,当任一参数达到预警时应及时采取措施调整参数。

2) 土压模式闸门防喷。为防止泥水模式滞排,需在刀盘刚进入全、强风化层便转换为土压模式,但此时开挖断面上部主要为砂层,存在螺旋机喷涌风险,因此土压模式下需间断控制螺旋机闸门开度,持续进行双闸门关闭、开启动作,避免喷涌,必要时向土仓注入膨润土泥浆及高分子聚合物进行渣土改良。

3) 螺旋机卡钢筋。掘进过程中时刻关注螺旋机扭矩,发现螺旋机扭矩过大、螺旋机出现异响或被卡情况时,及时进行清理,每斗掘进完成后检查

螺旋机闸门是否存在钢筋,清理螺旋机前应进行仓内保压,防止掌子面失稳。一旦出现螺旋机卡钢筋,且闸门无法关闭,此时可向螺旋机筒内注入磷酸水玻璃或复合聚氨酯材料封闭喷涌通道。现场试验表明,磷酸水玻璃及复合聚氨酯材料固化后不影响螺旋机启动。在螺旋机安全状态下采用分体式液压钢筋剪钳清除钢筋^[4]。

4) 皮带机盯控。根据相邻区间切桩经验,切削桩体基本为长条形钢筋,易造成皮带破损不能连续掘进,施工时安排人员盯控皮带,及时清理钢筋。

5) 土压模式仓压控制。土压模式掘进过程中保持泥水模式的泥浆管接入,当现场出现仓内压力波动 $>20\text{kPa}$ 时,可用进泥管向仓内注入泥浆辅助盾构掘进施工,确保仓压稳定可控。

6) 管片稳固措施。为加快同步注浆凝固时间,在管片脱出盾尾后,掘进期间通过管片注浆孔向未凝固的同步注浆层中注入水玻璃以加速浆液凝固。对脱出盾尾后3环管片进行二次注浆。当现场测得沉降变形达到 5mm 时,适当提高前方掘进同步注浆量。

4.2 切桩过程中掘进参数波动

左、右线盾构下穿过程中盾构施工参数波动如图13~15所示。

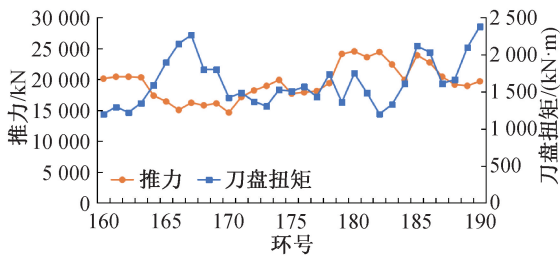


图13 右线推力及扭矩监测结果

Fig. 13 Thrust and torque monitoring results on the right line

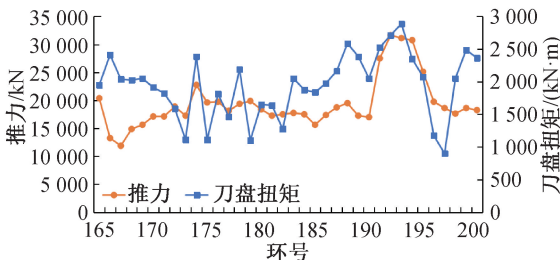


图14 左线推力及扭矩监测结果

Fig. 14 Thrust and torque monitoring results on the left line

右线施工时,盾构进入下穿段后推力、扭矩出现缓慢增加。这可能是由于隧道断面中的全、强风化泥质砂岩逐渐增多,地层中的黏粒含量不断增加

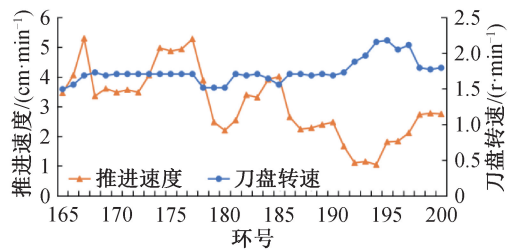


图15 刀盘转速及掘进速度控制

Fig. 15 Control of cutterhead rotation speed and excavation speed

导致。而从183环之后,土仓内出现钢筋,因此扭矩有所增加,但由于只切削1根桩,因此环平均掘进参数并没有显著变化,均处于一个较低水平。

左线从185环开始切桩,之后10环推力和扭矩均持续增加,随后逐渐下降。对比右线可推断出现这一现象的原因可能是随着盾构机不断切桩,而螺旋机排出钢筋缓慢且易被长钢筋卡住,仓内混凝土块和钢筋逐渐积聚,导致掘进参数增大。当清理出长钢筋后仓内大块逐渐排出,使得仓内排渣顺畅,可一定程度上降低参数。200环之后隧道下部逐渐出现中风化泥质砂岩,进一步导致参数上升。相较于全断面中粗砂地层,复合地层切桩段最大扭矩增加11.1%,最大推力增加24%,均处于小波动可控范围,相较于早期下穿既有车站时的参数波动有显著下降,说明现场采取的控制措施有利于控制切桩时平稳掘进。

4.3 既有隧道变形控制效果

在左、右线盾构隧道下穿过程中对既有隧道进行了沉降监测,如图16所示。由图16可看出,盾构下穿过程中箱涵整体呈下降趋势,最大沉降为 5.99mm ,磨桩完成后既有线沉降有所回升,分析其原因主要是盾构掘进后期增加了同步注浆量和二次注浆量,导致既有隧道产生轻微抬升。

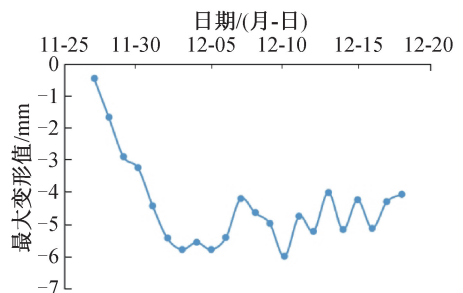


图16 既有隧道沉降监测结果

Fig. 16 Monitoring results of existing tunnel settlement

5 结语

1) 隧道抗浮验算结果表明,采取抗浮措施后隧

道结构抗浮安全系数为 1.451,如不考虑磨桩后剩余桩基的承载力,则抗浮安全系数为 1.420,均大于规范要求的安全系数,即隧道整体抗浮满足要求。

2)盾构掘进对既有隧道位移影响的三维整体模拟分析结果表明,盾构掘进导致既有隧道最大总位移为 5.8mm,位于闭口段。盾构掘进过程中,沉降缝间最大错动量为 2.2mm,处于渐变段与闭口段之间,均满足要求。

3)盾构掘进诱发隧道内力影响的三维模拟分析结果表明,预测盾构掘进诱发隧道最大的弯矩为 867kN·m,出现在渐变段,验算最大裂缝宽度为 0.079mm,满足规范要求。

4)按切桩下穿施工要点管理,最终盾构下穿过程中最大扭矩为 3100kN·m,最大推力为 33000kN,远小于设备额定参数,此类桩基对设备产生的额外负荷较小。

5)盾构穿越后既有隧道最大变形 5.99mm,与数值计算结果接近,采取措施后最终稳定变形 4.5mm,实现毫米级变形控制,措施切实有效。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022[J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(4): 1-40.

[2] 贾蓬,孙占阳,赵文,等. 盾构切削桩基研究现状综述[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(10): 1637-1656.
JIA P, SUN Z Y, ZHAO W, et al. Overview on research of shield cutting pile foundation[J]. Tunnel construction, 2023, 43(10): 1637-1656.

[3] 蒋啸天,李章林,何国军,等. 大直径盾构切穿抗滑桩对堤岸的变形影响分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2024, 30(1): 164-173.
JIANG X T, LI Z L, HE G J, et al. Analysis on the influence of large diameter shield cutting through anti-slide pile on embankment deformation[J]. Journal of Shanghai University (natural science edition), 2024, 30(1): 164-173.

[4] 杨志勇,余俊,刘杰,等. 土压平衡盾构斜切大直径主筋桩群施工技术[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 127-134.
YANG Z Y, YU J, LIU J, et al. Construction technology of oblique cutting large diameter main reinforcement pile group by EPB shield[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 127-134.

[5] 王德福. 盾构滚刀切削桩基相互作用机理及关键参数分析研究——以海珠湾盾构隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(1): 216-228.
WANG D F. Study on interaction mechanism and key parameters of shield cutter cutting the pile foundation: case study of Haizhu Bay Shield Tunnel project[J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(1): 216-228.

[6] 吴滨源. 盾构隧道下穿既有地铁线路切削群桩综合技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
WU B Y. Research on comprehensive technology of cutting pile groups for shield tunneling under existing subway lines[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[7] 吴志峰,刘永胜,张杰,等. 盾构直接切除大直径桩基的试验与工程实践[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S2): 280-288.
WU Z F, LIU Y S, ZHANG J, et al. Test and engineering practice of direct removal of large diameter pile foundation by shield[J]. Tunnel construction, 2020, 40(S2): 280-288.

[8] 张雨,原忠权,吴俊. 复合岩层盾构连续掘进磨削穿越排桩施工技术研究[J]. 施工技术, 2016, 45(S2): 139-143.
ZHANG Y, YUAN Z Q, WU J. Study on construction technology of continuous excavation, grinding and crossing row piles by shield in composite strata[J]. Construction technology, 2016, 45(S2): 139-143.

[9] 袁大军,王飞. 盾构切削大直径钢筋混凝土群桩的理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2017.
YUAN D J, WANG F. Theory and practice of shield cutting large diameter reinforced concrete pile groups[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[10] 王飞,袁大军,董朝文,等. 盾构直接切削大直径钢筋混凝土桩基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2566-2574.
WANG F, YUAN D J, DONG C W, et al. Experimental study on direct cutting of large diameter reinforced concrete pile foundation by shield[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(12): 2566-2574.

[11] 刘浩. 盾构直接切削大直径桩基的刀具选型设计研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
LIU H. Research on the cutter selection and design of shield cutting large diameter pile directly[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[12] 林向阳,李兆平,刘欣然,等. 富水粉质黏土地层土压平衡和泥水平衡盾构掘进模式转换试验研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(2): 79-83, 91.
LIN X Y, LI Z P, LIU X R, et al. Experimental study on conversion of shield tunneling mode between earth pressure balance and mud-water balance in water-rich silty clay stratum[J]. Railway standard design, 2022, 66(2): 79-83, 91.

[13] 袁守谦,邵云. 双模式盾构切削机场地下通道管桩群施工技术[C]//2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册), 2023.
YUAN S Q, SHAO Y. The construction technology of double-mode shield tunneling for cutting through pile groups in the underground passage of the airport[C]//Proceedings of the 2023 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference (Volume I), 2023.

[14] 黄钟晖,陈凡,孟庆军,等. 复合地层双模式盾构风险分析与针对性设计[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S2): 297-305.
HUANG Z H, CHEN F, MENG Q J, et al. Analysis of risks and targeted design of dual-mode shield in composited strata[J]. Tunnel construction, 2020, 40(S2): 297-305.