

DOI: 10.7672/sgjs2025230078

盾构隧道长距离穿越桥梁桩基群的三维数值模拟与风险控制策略研究*

徐文田¹, 叶宇航^{1,2}, 罗旭¹, 裴行凯¹

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘要] 为有效控制城市核心区综合管廊盾构隧道长距离穿越桥梁桩基群的安全风险,以广州中心城区综合管廊复杂区间隧道工程为背景,结合周边高密度建成环境、复杂地质水文条件及管廊建设特点,通过三维数值仿真与理论解析方法,系统揭示隧道穿越施工的力学行为特征与风险演化规律。创新性提出三维数值模拟-理论解析-动态调控一体化分析方法,以及结合地层注浆强化、临时支顶优化及AB料同步注浆的综合风险控制体系,并通过现场实测数据验证模型准确性,形成适用于复杂地质与空间约束的风险控制体系。结果表明,桥梁桩基竖向沉降实测值与数值模拟值的误差<8%,正下穿 30 轴桩基最大沉降量仅2.57mm,验证了注浆加固与支顶措施有效性。采用AB料注浆技术可将浆液初凝时间缩短至14min,地层损失率降低42%,显著抑制地表及桩基沉降,减少二次注浆频次,并提升掘进效率。

[关键词] 隧道;综合管廊;盾构;桩基群;数值模拟;注浆;风险控制

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)23-0078-05

Study on 3D Simulation and Risk Control Strategies for Long-distance Shield Tunneling Crossing Bridge Pile Groups

XU Wentian¹, YE Yuhang^{1,2}, LUO Xu¹, PEI Xing kai¹

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To mitigate safety risks during long-distance shield tunnelling of urban utility tunnels under-crossing bridge pile groups, this study investigates a complex tunnel section of the Guangzhou central utility tunnel project. Considering the constraints of high-density built environment, complex geohydrological conditions, and specific construction requirements, 3D numerical simulations and theoretical analysis are used to characterize mechanical behavior and risk evolution during the tunnel under-crossing process. An innovative framework integrating 3D numerical simulation, theoretical analysis, and dynamic control is established, supporting a comprehensive risk-control system comprising ground reinforcement grouting, optimized temporary support, and simultaneous AB slurry grouting technology. Simulation and analysis accuracy is validated against field monitoring data, yielding a reliable risk-control framework suitable for complex geological and spatially constrained engineering conditions. The results demonstrate that, the difference ratio between monitored and simulated vertical settlements of bridge piles is less than 8%, and the maximum settlement of the directly under-crossed pile 30 is only 2.57mm, evidencing the reliability of the proposed framework and effectiveness of grouting and support measures. The AB slurry grouting technology has reduced the initial setting time to 14 minutes and decreased the ground loss rate by 42%, thereby significantly inhibiting surface and pile settlements, decreasing the need for secondary grouting, and improving tunnelling efficiency.

Keywords: tunnels; utility tunnel; shields; pile groups; simulation; grouting; risk control

* 广州市重点研发计划(20220602JBGS01); 广州地铁设计院股份有限公司科研项目(KY-2024-041)

[作者简介] 徐文田, 高级工程师, E-mail: xuwentian@gmdi.cn

[收稿日期] 2025-06-09

0 引言

近年来,综合管廊在我国进入快速发展阶段,综合管廊设计^[1-2]、施工技术^[3-4]和标准^[5]等被积极探索。目前,发达城市的老旧城区内,城市轨道交通、市政隧道、大型地下综合体、桥梁桩基等设施占用大量地下空间,地下管线复杂密集,工程建设环境极其严苛,盾构法、顶管法是解决老旧城区综合管廊建设难题的有效手段。

目前,针对盾构隧道穿越既有建(构)筑物,已有大量学者通过数值模拟、现场监测和理论分析等手段进行相关研究。周济民^[6]、付文生等^[7]研究盾构隧道穿越桥梁桩基的影响;汪海波等^[8]、高利宏^[9]、刘士海等^[10]研究盾构隧道穿越既有隧道结构的影响;冯涵等^[11]、孙波等^[12]研究盾构隧道穿越既有建筑物的影响。既有研究多聚焦于隧道局部穿越工况,缺乏对综合管廊长距离穿越桩基群系统性风险控制的理论支撑与实践验证。

本文以国内首例沿地铁线路同步建设的广州中心城区综合管廊为研究对象,创新性提出三维数值模拟-理论解析-动态调控一体化分析方法,结合AB料注浆技术优化与临时支顶力学调控方法,形成适用于复杂地质与空间约束条件的风险控制体系。

1 工程概况

广州中心城区综合管廊沿轨道交通 11 号线敷设,全长 44.9km,采用外径 6.0m 的盾构隧道结构,如图 1 所示。工程需连续穿越 1.5km 长桥梁桩基群,最小平面净距仅 0.95m,并涉及断层破碎带、既有地铁线路等复杂工况,如图 2 所示。经多方案比选,最终采用竖向避让结合动态加固的优化路径,如图 3 所示,重点控制正下穿 36 号端承桩(净距 2.92m)的沉降风险。

2 风险控制技术

采用竖向避让结合动态加固的方案施工,盾构隧道下穿桥梁桩基,会破坏原有土体平衡,导致桩基础底部土体沉降、土性改变,易丧失桩端承载力,桩产生较大沉降,危及上部结构安全^[13],还可能产生负摩阻力,大幅削弱桩基承载力。另一方面,本工程区间隧道穿越范围存在断层破碎带等不利地质,盾构穿越施工易引起较大安全风险,主要采取以下控制措施。

1) 地层气密性保障

通过抽水试验测得断层破碎带渗透系数为 0.185m/d,气密性好,表明土压平衡盾构可直接掘进。

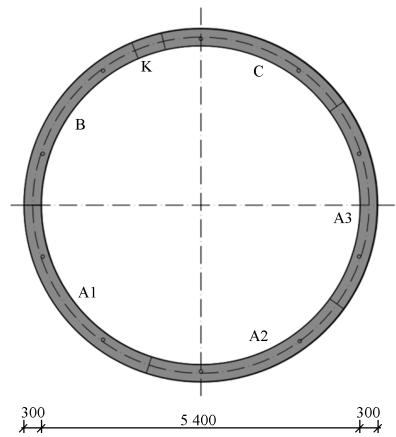


图 1 衬砌结构示意图

Fig. 1 Lining structure



图 2 线路平面走向

Fig. 2 Plan trend of the line

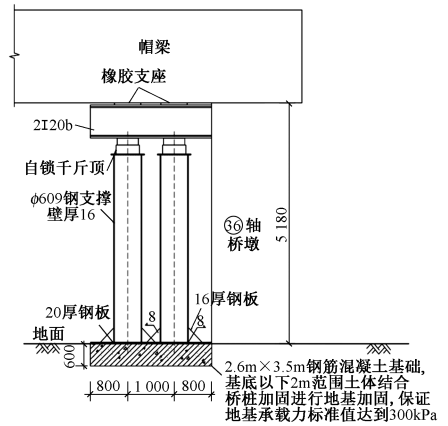


图 3 36 轴桥桩临时支顶措施

Fig. 3 Temporary support measures of 36 bridge pile

2) 桥梁桩基周边地层差异化注浆加固

将袖阀管预注浆(破碎带)与跟踪注浆(岩层)相结合,显著提高桩周摩阻力^[14]。注浆压力梯度为 0.5~1.5 MPa,注浆量为 30~100L/min,管注浆速度宜<15cm/min,应沿桩周对称、同时加压注浆。

3) 力学补偿支顶系统

将对钢管临时支顶结构预施加 100kN 轴力并进行动态调整,形成桩-土-支撑协同承载机制。当盾构到达前 30m,施工完临时支撑,并及时施加预顶力,根据沉降监测数据及时施加预顶力,以确保桥

桩沉降 $\leq 10\text{mm}$, 沉降速率 $\leq 1\text{mm/d}$, 盾尾离开 70m 后若监测数据稳定, 方可拆除临时支撑。

3 穿越施工力学响应分析与控制

3.1 三维数值分析

利用 MIDAS GTS 有限元软件建立精细化模型, 如图 4 所示, 采用修正的莫尔-库仑准则模拟地层非线性行为(见表 1)。盾构掘进过程中, 施工控制参数主要包括盾构掌子面压力、盾构同步注浆压力等, 结合实际项目, 土仓压力控制在 0.12~0.2MPa, 同步注浆压力为 0.2~0.3MPa, 本次数值模拟分析掌子面压力为 0.15MPa, 同步注浆压力为 0.25MPa。桥桩采用 C25 钢筋混凝土, 为桩单元, 隧道结构为 C50 钢筋混凝土, 桥梁上部结构为 C30 钢筋混凝土, 均采用 3D 实体单元。三维有限元计算模型边界条件如下: 模型底部为 z 向位移约束, 模型后面为 y 向约束, 模型左右面为 x 向约束。施工模拟流程如下: 计算初始应力场 \rightarrow 建立桥梁桩基结构 \rightarrow 按照设计路线进行盾构隧道掘进, 并依次进行同步注浆、管片拼装, 全过程共 130 个施工步骤。

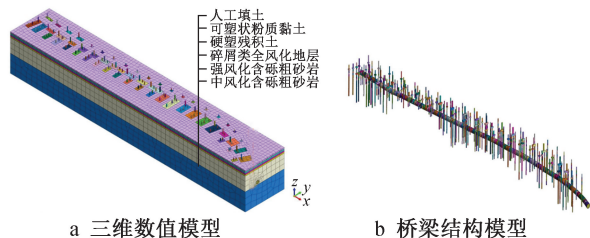


图 4 三维数值分析模型

Fig. 4 3D numerical model

表 1 岩土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil layers

岩土层	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	直接快剪 黏聚力/ kPa	直接快剪 内摩擦角/ ($^{\circ}$)	变形 模量/ MPa
填土	1.75	0.36	8.0	10.0	6
中粗砂	1.95	0.25	0.0	30.0	20
可塑状粉质黏土	1.98	0.30	20.0	15.3	16
硬塑残积土	2.03	0.28	24.0	19.0	30
碎屑类全风化地层	2.06	0.27	30.0	22.0	80
强风化砾岩、 含砾粗砂岩	2.15	0.23	37.0	26.0	100
中风化砾岩、 含砾粗砂岩	2.50	0.20	500.0	35.0	—
微风化砾岩、 含砾粗砂岩	2.60	0.18	700.0	40.0	—
土状断裂破碎带	2.05	0.27	25.0	20.0	70
角砾状断裂破碎带	2.18	0.25	37.0	26.0	100

根据三维数值计算分析模型, 得到桥桩各向位移发展(见图 5)及最大位移。盾构穿越施工前期,

盾构与桥桩水平距离相对较大, 桩端进入岩层且盾构在较好的地层中, 以侧穿为主, 主要影响桩周侧摩阻力, 桥梁各向位移最大值约 1mm。随着盾构进入断层破碎带, 部分桩基底部位于隧道洞身以上, 不仅影响桥桩侧摩阻力, 更影响桩端承载力, 桥桩各项位移增大至约 2mm。桥桩最大位移发生于盾构正下穿 $\textcircled{30}$ 轴桥梁桩基, 桩端土体应力重分布导致竖向位移达到峰值, 最大水平位移为 1.3mm (y 向), 最大竖向位移为 3.3mm, 最大总位移为 3.3mm, 均低于规范限值, 穿越施工过程安全可控。

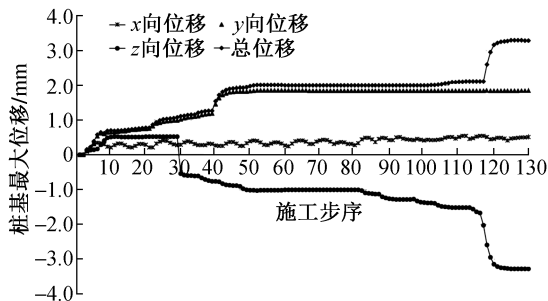


图 5 桥梁桩基各方向位移发展

Fig. 5 Displacement development process of bridge pile foundation

3.2 桥梁桩基受力分析

盾构穿越桥桩施工过程中, 必然导致隧道周边土体失去平衡, 向隧道方向侧移, 一定程度引起桥梁桩基桩身产生水平弯矩^[15], 需验算桩基水平受力。根据平面中曲线任一点曲率 $\varphi(x)$ 的计算过程可知, 桥桩桩长远大于桥桩结构水平位移, 因此曲率 $\varphi(x)$ 计算如下:

$$\varphi(x) = \frac{f''(x)}{x^2} \approx -\frac{1}{\rho} = -\varphi \quad (1)$$

根据材料力学知识可知 $M = EI/\rho$, 所以有:

$$M(x) = -EI \frac{f''(x)}{dx^2} \quad (2)$$

式中: x 为桥桩沿深度方向的坐标数据; $f(x)$ 为桩身水平位移; $\varphi(x)$ 为函数曲率; ρ 为函数图形的曲率半径; $M(x)$ 为桩身水平弯矩; EI 为桥桩截面抗弯刚度。

根据上述理论, 通过有限元软件计算桥桩水平位移, 利用曲线拟合中的线性最小二乘法反算得到桩基水平附加弯矩。选取 $\textcircled{18}$ 轴、 $\textcircled{30}$ 轴、 $\textcircled{37}$ 轴水平受力风险最大的桩基进行验算, 其中 $\textcircled{30}$ 轴桩水平位移最大, $\textcircled{18}$ 轴桩与隧道水平距离最近, $\textcircled{37}$ 轴桩与隧道水平距离较小且桩底距隧道底距离较小。桥桩水平位移随深度变化如图 6 所示, 盾构穿越施工后, $\textcircled{18}$ 轴、 $\textcircled{30}$ 轴、 $\textcircled{37}$ 轴桩基产生最大附加弯矩增量分别为

10,226,20kN·m。根据 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》(2024 年版)及桩基配筋图计算可知,桥桩水平受弯承载力 $M_u = 2\,179\text{kN}\cdot\text{m}$,桥桩桩基水平受力满足设计要求,穿越施工对桩基水平承载力影响较小,安全风险可控。

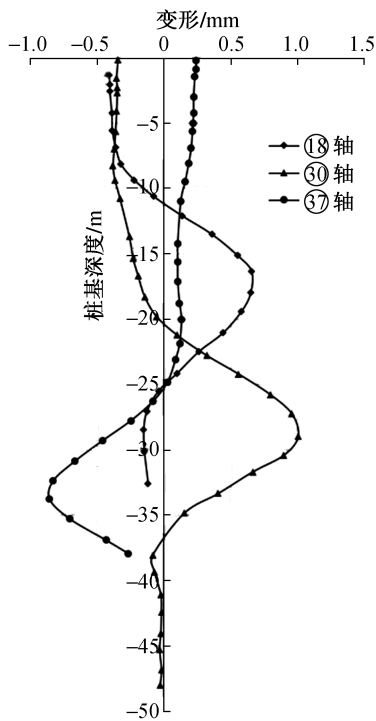


图6 桥梁桩身水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of bridge pile

盾构穿越施工对桩基竖向承载力产生影响,需进一步复核桩基承载力安全性。选取⑬轴、⑳轴、㉟轴风险最大的桩基进行验算,其中⑬轴桩与隧道最近,⑳轴桩为正下穿,㉟轴桩与隧道水平距离较小且深入隧道底部较浅,以最不利参数验算桩基竖向承载力。考虑盾构施工扰动影响桩基承载力,基于工程安全角度,按照⑳轴、㉟轴桩基不考虑桩端承载力,⑬轴、㉟轴桩基不考虑盾构直径范围内的桩侧摩阻力原则进行复核算,以确保工程安全。根据 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》中端承桩的计算式,计算单桩竖向承载力容许值。按照 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》,取公路 I 级车道荷载,考虑梁跨 25m 长,计算桩基竖向轴力标准值,结果如表 2 所示。由桩基承载力安全系数验算可知,⑳轴桩承载力冗余度达 37%,表明设计措施可靠。

3.3 施工控制技术

结合盾构穿越的三维数值模拟及理论计算分析结果可知,盾构穿越施工会引起桥梁水平位移及沉降,影响桩基水平受力及竖向承载力。尤其是盾

表 2 桩基承载力验算

Table 2 Checking calculation of pile foundation bearing capacity

项目	桩基轴号		
	⑬轴	⑳轴	㉟轴
桩径/m	1.5	1.5	1.5
桩长/m	33	26	38
桥桩类型	端承桩	端承桩	端承桩
土层摩阻力/kN	672	672	672
岩层摩阻力/kN	2 331	2 798	9 086
端阻力/kN	141	0	0
单桩竖向承载力 R_a /kN	3 144	3 470	9 758
竖向轴力标准值 N_k /kN	2 533	2 533	2 533
安全系数 (R_a/N_k)	1.24	1.37	3.85

构穿越破碎带时,盾构掌子面可能出现漏气冒浆情况,导致掌子面压力不稳定,加剧盾构穿越对桥梁桩基的影响。另一方面,采用常规同步注浆工艺的浆液初凝时间较长,在复杂环境施工时无法保证控制地层变形效果。针对上述问题,采取盾构机洞内超前注浆及 AB 料同步注浆的技术。

当盾构穿越破碎带时,应进行盾构机洞内超前注浆措施,注浆孔一次钻至注浆深度,以 1m 为 1 个注浆段进行注浆,每段注浆段反复注浆 2~3 次,依次由里向外分段后退式注浆,注浆量根据注浆压力及建(构)筑物的变形及沉降进行控制,将浆液凝固时间调至 30s,当注浆压力达 0.25MPa 后,重新换孔进行注浆。

同步注浆采用 AB 料(A 料和 B 料)注浆技术,其中 A 料具有促凝促强作用,B 料具有活性激发作用。通过调整 A,B 料的配合比,可有效控制浆液稠化及硬化时间。在一定范围内,B 料的量越多凝固时间越短。通过配合比试验,监测试验段管片上浮情况,最终确定最优配合比为 A 料 $15\text{kg}/\text{m}^3$ 、B 液 $25\text{kg}/\text{m}^3$,使浆液初凝时间由常规 $>2\text{h}$ 缩至 14min,同步注浆效率提升 60%。现场监测结果表明,该技术使管片上浮量降低 52%,桥桩沉降速率稳定 $<0.5\text{mm}/\text{d}$ 。同时,有效减少二次注浆施工,加快盾构穿越破碎带及桥梁桩基的速度。AB 料配合比试验结果如表 3 所示。

表 3 AB 料配合比试验结果

Table 3 Proportioning test results of AB material

工况	A 料密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	B 料密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	初凝 时间/min
1	0	0	>120
2	15	20	17
3	15	22	16
4	15	25	14
5	15	28	12
6	15	30	10

4 现场实测结果与施工效果验证

本工程长距离穿越桥梁桩基群施工采用信息化监测系统,可实时反馈数据并动态调整盾构参数。盾构穿越过程中,⑮轴、⑳轴、㉑轴、㉒轴桩基竖向位移实测结果如图7所示,实测位移与三维数值模拟计算所得最大位移基本吻合,桥桩最大沉降量为2.77mm(㉒轴桩),与模拟值的偏差仅6.3%。地表沉降均值<5.2mm,显著低于30mm控制值。临时支顶系统使㉑轴桩沉降回弹0.8mm,表明其具有力学补偿效应。

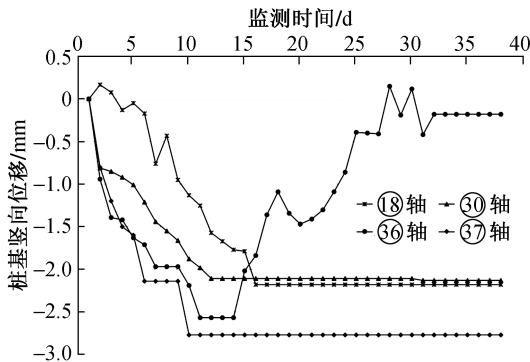


图7 桥桩竖向位移实测结果

Fig. 7 Measured results of vertical displacement for bridge pile

盾构长距离穿越桥梁桩基群施工过程中,地层气密性和信息化反馈施工,能够平稳控制盾构掌子面压力,桥梁桩基及上部结构位移及沉降较小,设计及施工控制措施有效,尤其是将AB料注浆材料用于同步注浆,及时填充盾尾间隙,减小地层损失率,形成止水环,有效控制地表沉降及桥桩沉降。

5 结语

1) 三维数值模型可准确预测桩基位移趋势,且误差范围<7%,为动态施工调控提供理论依据,盾构正下穿施工对桥梁桩基影响较大,应采取有效风险措施。

2) AB料同步注浆技术通过浆液配合比定制化设计,实现地层损失率与工期双重优化,降低工程实施风险。

3) 临时支顶系统为桥梁结构提供有效补偿效应,是盾构穿越施工风险控制的可行措施。

后续研究将聚焦于桩基-隧道相互作用机制及长期服役性能评估中,进一步完善综合管廊穿越工程的全生命周期风险控制理论。

参考文献:

[1] 顾卫兵,冯宇韬,刘江涛,等. 预制装配式管廊受力性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):91-97.
GU W B, FENG Y T, LIU J T, et al. Experimental research on

mechanical performance of prefabricated utility tunnel [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2020, 18(1):91-97.

- [2] 崔海婕. 省会试点城市综合管廊规划设计与方法探究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5):1304-1311.
CUI H J. Planning and design method of comprehensive corridor of provincial capital city [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(5):1304-1311.
- [3] 郑康泰. 矩形掘进机在综合管廊建设中的应用[J]. 建筑机械化, 2021, 42(7):7-12.
ZHENG K T. Rectangular TBM application in utility tunnel construction [J]. Construction mechanization, 2021, 42(7):7-12.
- [4] 王全胜,李洋,杨聚辉,等. 综合管廊U型盾构机械化施工工法研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(5):839-845.
WANG Q S, LI Y, YANG J H, et al. Research and application of mechanized U-shaped shield tunneling to utility tunnel [J]. Tunnel construction, 2018, 38(5):839-845.
- [5] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,同济大学. 城市综合管廊工程技术标准:GB 50838—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2024.
Shanghai Municipal Engineering Design Institute(Group) Co., Ltd., Tongji University. Standard for urban utility tunnel engineering: GB 50838—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2024.
- [6] 周济民. 盾构区间隧道下穿高架桥桩基群施工技术与环境影响预测[J]. 现代隧道技术,2016,53(1):165-172.
ZHOU J M. Construction technology and environmental impact prediction for a shield tunnel under a viaduct pile foundation group [J]. Modern tunnelling technology, 2016, 53(1):165-172.
- [7] 付文生,夏斌,罗冬梅. 盾构隧道超近距离穿越对桩基影响的对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1):133-138.
FU W S, XIA B, LUO D M. Comparison research on effect of shield tunnel traversing adjacently under existing pile foundations [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2009, 5(1):133-138.
- [8] 汪海波,吴悦,徐才厚,等. 砂泥岩地层双线盾构隧道近距侧穿铁路桥桩基施工优化分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(14):60-65.
WANG H B, WU Y, XU C H, et al. Optimization analysis of pile foundation construction of double-line shield tunnel crossing railway bridge at close distance in sandy mudstone stratum [J]. Construction technology, 2023, 52(14):60-65.
- [9] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(4):194-202.
GAO L H. Analysis of settlement deformation and construction joints control of a double-line shield tunnelling passing under existing tunnel in close distance [J]. Modern tunnelling technology, 2021, 58(4):194-202.

- 液的柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1415-1425.
- YANG Z Q, NIU X D, HOU K P, et al. Columnar diffusion of cement grout with time dependent rheological parameters [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2015, 34(7): 1415-1425.
- [18] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 宾汉姆流体柱-半球形渗透注浆形式扩散参数的研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015(S2): 47-53.
- YANG Z Q, NIU X D, HOU K P, et al. Study on diffusion parameters of Bingham fluid column-hemispherical infiltration grouting form [J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2015(S2): 47-53.
- [19] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 幂律型流体柱形渗透注浆机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 178-183.
- YANG Z Q, NIU X D, HOU K P, et al. Column penetration grouting mechanism researches based on Power-law fluid [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 178-183.
- [20] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2415-2421.
- LI S C, LIU R T, ZHANG Q S, et al. Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(12): 2415-2421.
- [21] 张庆松, 张连震, 张霄, 等. 基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1198-1210.
- ZHANG Q S, ZHANG L Z, ZHANG X, et al. Grouting diffusion in a horizontal crack considering temporal and spatial variation of viscosity [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2015, 34(6): 1198-1210.
- [22] 张连震, 张庆松, 刘人太, 等. 考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 443-452.
- ZHANG L Z, ZHANG Q S, LIU R T, et al. Penetration grouting mechanism of quick setting slurry considering spatiotemporal variation of viscosity [J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(2): 443-452.
- [23] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709-2714.
- RUAN W J. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2005, 24(15): 2709-2714.
- [24] 李术才, 张伟杰, 张庆松, 等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 744-752.
- LI S C, ZHANG W J, ZHANG Q S, et al. Research on advantage-fracture grouting mechanism and controlled grouting method in water-rich fault zone [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(3): 744-752.
- [25] 张伟, 陈文义. 流体力学 [M]. 2 版. 天津: 天津大学出版社, 2009.
- ZHANG W, CHEN W Y. Fluid mechanics [M]. 2 edition. Tianjin: Tianjin University Press, 2009.
- [26] 沈仲棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- SHEN Z T, LIU H N. Non-Newtonian fluid mechanics and its application [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [27] 王星华. 黏土固化浆液在地下工程中的应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- WANG X H. Application of clay solidified slurry in underground engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998.
- (上接第 82 页)
- [10] 刘士海, 贺美德, 刘继尧. 新建隧道斜交下穿既有盾构隧道的变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 263-272.
- LIU S H, HE M D, LIU J Y. Deformation analysis on existing shield tunnel obliquely crossed by new tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(1): 263-272.
- [11] 冯涵, 张学民, 乔世范, 等. 双线盾构隧道下穿既有建筑物诱发地表变形规律分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 866-871.
- FENG H, ZHANG X M, QIAO S F, et al. Analysis of ground deformation caused by two track shield tunnelling under existing building [J]. Journal of railway science and engineering, 2015, 12(4): 866-871.
- [12] 孙波, 肖龙鸽, 孙正阳, 等. 深圳地铁盾构穿越建筑群及切割桩基施工[J]. 隧道建设, 2015, 35(6): 571-578.
- SUN B, XIAO L G, SUN Z Y, et al. Construction of Shenzhen Metro shield crossing buildings and cutting pile foundation [J]. Tunnel construction, 2015, 35(6): 571-578.
- [13] 倪安斌. 泥炭(质)土地层中盾构法施工对邻近桥梁的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 168-173, 180.
- NI A B. Analysis of influence for shield tunnelling in cumulosol strata on adjacent bridges [J]. Modern tunnelling technology, 2014, 51(3): 168-173, 180.
- [14] 何海健, 刘维宁, 项彦勇, 等. 地铁施工对邻近桥桩影响的研究现状与探讨[J]. 都市轨道交通, 2006, 19(5): 85-88.
- HE H J, LIU W N, XIANG Y Y, et al. Summary of current studies and discussions on effects of metro construction on adjacent bridge piles [J]. Urban rapid rail transit, 2006, 19(5): 85-88.
- [15] 龚爱军, 辛振省. 盾构近接桥梁施工对桥梁桩基的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2008(11): 77-79.
- GONG A J, XIN Z S. Study on influence of shield proximity bridge construction on bridge pile foundation [J]. Railway standard design, 2008(11): 77-79.