

3D 打印隧道衬砌-围岩界面力学性能研究*

瞿 锋

(上海申通地铁集团有限公司, 200122, 上海)

摘 要 [目的] 3D 打印技术在工程结构施工的研究和应用已逐渐深入, 应用 3D 打印建造地铁隧道开拓了一种新的思路和方法, 而 3D 打印施工过程中, 衬砌与隧道围岩的共构效果和协同工作性能的保障是构建隧道衬砌结构体系的关键, 需对其进行深入研究。[方法] 通过试验模拟不同围岩条件下的界面特性, 深入研究了 3D 打印隧道施工中衬砌和围岩之间的粘结力学性能及其影响因素。[结果及结论] 围岩表面的粗糙度对 3D 打印衬砌混凝土的粘结效果有显著影响, 而表面涂覆涂层能够有效改善衬砌-围岩界面的粘结性能, 通过填补衬砌-围岩界面的微观不平整有利于提高 3D 打印衬砌施工质量。

关键词 地铁; 隧道衬砌; 3D 打印; 粗糙度; 粘结力学性能; 界面微观结构

中图分类号 U455.91

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.032

Study on Mechanical Performance of Tunnel Interface between 3D Printed Lining and Surrounding Rock

QU Feng

(Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 200122, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Research on and application of 3D printing technology in engineering structure construction are gradually deepening. Applying 3D printing in tunnel construction creates a new idea and approach. In the process of 3D printing construction, ensuring the co-construction effect and collaborative working performance of tunnel lining and surrounding rock is crucial to building a tunnel lining structure system. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research on it. [Method] Through experimental simulation of the interface characteristics under different surrounding rock conditions, the bonding mechanical performance between the lining and surrounding rock is thoroughly investigated together with the influencing factors in 3D printing tunnel construction. [Result & Conclusion] The roughness of the surrounding rock surface significantly influences the bonding effect of 3D printed con-

crete lining, while the surface coating can effectively improve the bonding performance of the lining-surrounding rock interface. Filling in the micro unevenness of the interface is helpful to improve the construction quality of 3D printed lining.

Key words metro; tunnel lining; 3D printing; roughness; bonding mechanical performance; interface micro-structure

0 引言

隧道作为土木基础设施主要工程结构构筑形式之一, 是完成道路、铁路、地铁等交通功能的重要载体, 对现代城市的可持续发展和经济繁荣同样起着至关重要的作用^[1-2]。然而, 隧道的安全性、稳定性和持久性一直是工程师和研究人员关注的核心问题。在隧道工程中, 衬砌结构是保障隧道安全和稳定的关键组成部分之一^[3-4]。

衬砌结构不仅要能够承受来自地下水^[5]、地层压力^[6]和交通荷载^[7]等多重外部作用力, 还要在长期使用中保持结构的完整性和稳定性^[8]。而衬砌与围岩之间的粘结性能是影响隧道衬砌结构稳定性的关键因素之一^[9]。隧道开挖后, 衬砌结构与围岩岩壁的大面积牢固粘附可以提高围岩强度, 是各种围岩条件下保证隧道施工质量的有效手段之一^[10]。因此, 深入研究不同围岩条件下衬砌与围岩界面的粘结性能对提高隧道工程的质量和耐久性具有重要意义。

近年来, 随着隧道建设的新材料、新工艺、新工法、新技术、新理念、新结构等不断涌现, 3D 打印技术作为一种新型建造技术, 因其具有高度自适应性、定制化和可重复性等优势, 正在得到广泛应用^[11-13]。将 3D 打印混凝土应用于隧道工程的研究也逐渐增多, 如文献^[14-15]均开展了隧道衬砌结构 3D 打印施工建造技术的研究, 为拓展隧道结构建造技术提供了一种新的思路和方法。

* 上海市 2021 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(21DZ1203500)

隧道施工过程中,3D 打印混凝土与隧道围岩的有效粘结,可以形成良好的粘结界面,共同承载外来荷载。而隧道围岩与混凝土打印层的粘结性直接决定了两者之间的协同工作性能,因此,如何测试两者之间的粘结力以及确定影响两者粘结强度的因素成为主要研究内容之一。

本文旨在通过研究隧道施工过程中,不同围岩条件下的衬砌-围岩界面粘结性能,探讨如何改进隧道衬砌施工技术。在研究中,依据实际工程模拟了几种不同粗糙界面条件的围岩,对施工过程中围岩与隧道 3D 打印衬砌结构界面的粘结性能进行了试验研究,重点分析了界面粗糙度对施工质量的影响。同时,探讨如何在围岩表面添加涂层等提高施工质量的具体措施,以及其是否能够为隧道工程的可持续发展和工程质量提高做出重要支撑。

1 试验设计

1.1 围岩粗糙度与湿度模拟

在实际工程中,围岩与衬砌结构接触面大多不是平直面光滑的,表面状态往往是粗糙起伏的^[16],有一定的粗糙程度,这与包括围岩与混凝土之间的粘结性能在内的隧道 3D 打印衬砌结构的施工质量有很大关系。为此,试验准备了以下 4 种混凝土基底表面(长 300 mm,宽 300 mm):

1) 抛光表面(R1)。使用抛光机以 1 200、1 700、2 250、2 700、3 250、3 700 r/min 的转速对粗糙表面进行抛光。

2) 喷砂表面(R2)。使用压力为 0.7 MPa 的喷砂机对表面进行冲击,清除污垢和老化物,但清除程度有限。

3) 锤击表面(R3)。使用气锤(气锤型号为 29062)处理基底表面,敲击频率 3 000 次/min。

4) 表面喷水(R4)。使用 130 MPa 的高压水射流,破坏和清除基底表面污垢。

同时,为量化粗糙度,对于每个混凝土基底的表面轮廓 Z (基底表面点的剖面高度到平均剖面高度的距离,单位 mm),由 1 台激光扫描仪扫描^[17-18],并采用表面轮廓的均方根偏差 R_q (单位 mm)来表征表面粗糙度^[19]。

为了贴合施工现场的湿度条件,采用饱和表面-干燥表面,即将初始状态的基质在水槽中浸泡 24 h,然后晾干,直至达到饱和表面-干燥表面状态(持续时间为 10 min)。

1.2 3D 打印衬砌与围岩粘结力学试验

隧道 3D 打印衬砌结构施工中,围岩与 3D 打印混凝土间的一体化是保证打印的衬砌结构与不同粗糙界面的粘结性能的关键之一。这种粘结作用包括沿粘结面法线方向的抗拉作用以及沿粘结面切线方向的抗剪作用。试验中,重点针对粘结面的抗拉强度开展研究。

粘性性能测试设备为一台平行板(底面直径为 50 mm)的流变仪(型号为 Anton Paar MCR 102)。在两个固体表面间插入粘合剂层一定时间后,以固定速度将两个固体表面拉开,并记录拉力与分离位移(或时间)的关系^[20-21]。粘性试验的主要测试流程为:

1) 将外表面为圆柱的模具(高 20 mm,内径 50 mm)放在流变仪的底板上并固定;

2) 将新拌混凝土(配合比参照文献[22])放入圆柱形模具内,然后取下圆柱形模具;

3) 将用于模拟围岩表面的圆柱试样向下移动,直至底板与该圆柱试样底面之间的间隙达到 10 mm,相当于一个 3D 打印印刷层的厚度^[23];

4) 以 50 $\mu\text{m/s}$ 的恒定速度拉出混凝土圆柱形试样,最长时间为 500 s,并记录拉力与位移的关系曲线。

每个系列的试验重复进行 2 次,并采用相同的程序控制圆柱试样的表面含水率。此外,将试验分为两组:第一组中,圆柱试样的下表面未涂覆;第二组中,圆柱试样(即 R1-T、R2-T、R3-T 和 R4-T)的下表面人工涂覆了与测试材料成分相同的涂层。

1.3 3D 打印衬砌与围岩界面微观构型观测

为了更好地研究围岩表面粗糙度的影响,利用 TESCAN CoreTOM CT 成像系统对围岩表面进行高分辨率扫描,获取其影像数据(像素尺寸为 27 μm)。每个试样都扫描了 2 000 多张放射图像。然后,利用 Panthera 软件三维重建扫描影像所代表的孔结构。最后,使用交互式阈值方法从三维模型中提取气隙(试验结果如图 1 所示),以此来表征新拌材料与圆柱试件间的孔隙特征,从而分析 3D 打印层与围岩之间界面的微观特征。

2 试验结果及讨论

2.1 围岩表面粗糙度试验结果与分析

根据试验数据分析可知,抛光圆柱试样(R1)、喷砂圆柱试样(R2)、锤击圆柱试样(R3)和喷水圆

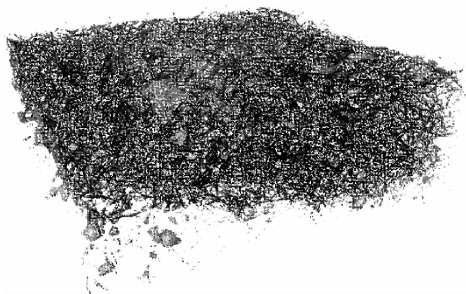


图1 Panthera 软件三维重建的围岩表面孔结构
Fig.1 3D surrounding rock surface microstructure
reconstructed by Panthera software

柱试样(R4)的表面轮廓的均方根偏差分别为0.03 mm、0.64 mm、1.26 mm、2.30 mm。该数据与文献中的同类研究结论类似。例如,文献[19]指出,由于高压水射流喷射混凝土表面可以去除混凝土核心或基体,其增加围岩表面粗糙度的效果明显好于喷砂技术。

2.2 3D 打印衬砌与围岩粘结力学特性分析

1) 根据两组模拟围岩与衬砌粘结性能测试数据绘制的拉力-位移曲线(见图2),所有曲线都分为两个阶段:第一阶段拉力不断增大,第二阶段拉力逐渐减小至零。

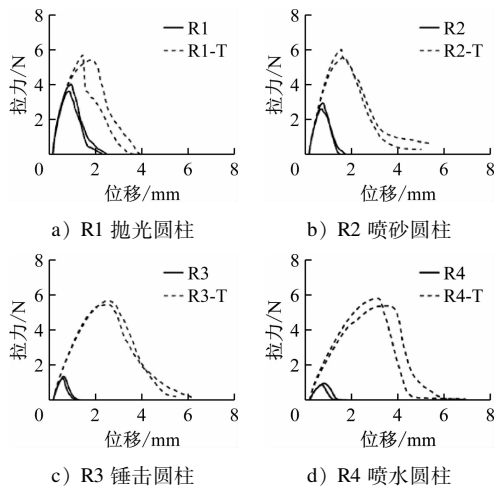


图2 衬砌与围岩粘结接触面的拉力与位移曲线
Fig.2 Tensile force and displacement curves of the bonding interface between the lining and surrounding rock

文献[24]指出,新拌材料在开始阶段主要表现为弹性行为或粘弹性行为,一段时间后则表现为塑性行为。在第二阶段,不可逆断裂开始出现,直至完全脱离^[25]。试验中也发现,断裂在未涂覆的新拌材料与圆柱试样的接触面处扩展,而对于涂覆的混凝土圆柱试样,破坏发生在涂层与新拌材料的接

触面。

2) 依据拉力-位移关系曲线,分别获取拉力峰值、临界位移(即拉力达到最大值时的位移)、总位移(拉力减小到零或稳定值时的位移)和耗散能量(测试中得到的拉力曲线与横轴形成的区域)等4个参数的量值,并加以分析。

(1) 拉力峰值。4组试样的拉力峰值曲线如图3所示。对于无涂层的圆柱试样,随着表面轮廓的均方根偏差从0.03(R1)增加到2.68(R4),拉力峰值的平均值从3.85 N逐渐减小到0.92 N,而对于有涂层的圆柱试样,拉力峰值几乎保持不变。其原因主要是,新拌材料抗剪力和顶板与新拌试样上表面之间界面力^[23,26]的共同作用。无涂层时,拉力峰值主要由界面处的力控制,当使用粗糙基底(如R4)时,界面上形成的接触有限,导致拉伸附着力受损,因此,拉力峰值随着基底粗糙度的增加而减小。有涂层时,涂层对界面的拉伸附着力有显著贡献,拉力峰值主要受新材料的抗剪性能控制。文献[23]也提出了相似的结论,即当新拌材料的屈服应力降低时,拉力峰值也随之降低。

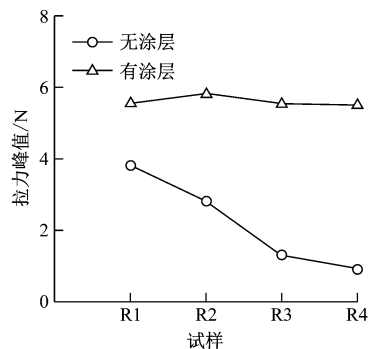


图3 4组试样拉力峰值曲线
Fig.3 Peak tensile force curves of four groups of samples

(2) 临界位移。4组试样的临界位移曲线如图4所示。未涂层的圆柱试样中,临界位移随着基底粗糙度的增加而略有减小。而有涂层的圆柱试样,临界位移随着基底粗糙度的增加而明显增大,尤其是混凝土圆柱试样R3-T和R4-T最为明显。

(3) 总位移。4组试样的总位移曲线如图5所示。总位移变化趋势与临界位移变化趋势基本一致,其主要原因是涂覆涂层间的“互锁”效应。在较粗糙的基面中,该效应更为明显。

(4) 耗散能量。4组试样的耗散能量曲线如图6所示。随着基体表面粗糙度的增加,无涂层情况下耗散能量有减少的趋势,而有涂层情况下则出现

了相反的现象。值得注意的是,有涂层的基底 R4-T 测得的耗散能量约为无涂层基底的 25 倍,这一巨大差异表明了涂覆涂层的重要性。

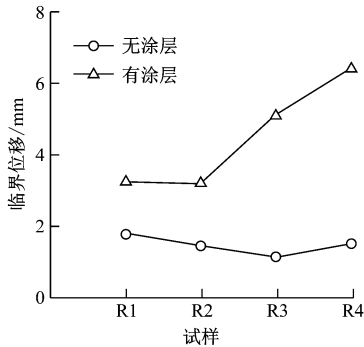


图4 4组试样临界位移曲线

Fig. 4 Critical displacement curves of four groups of samples

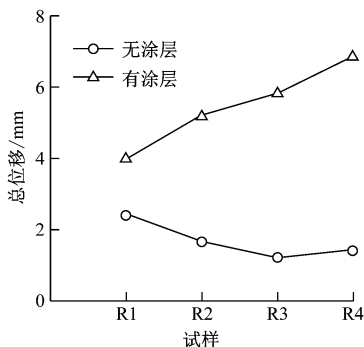


图5 4组试样总位移曲线

Fig. 5 Total displacement curves of four groups of samples

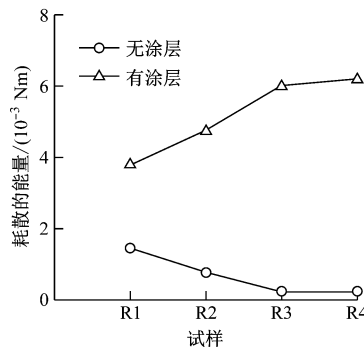


图6 4组试样耗能曲线

Fig. 6 Energy consumption curves of four groups of samples

综上,可以认为:新拌材料在第一阶段(达到拉力峰值之前)就超过了屈服点。而达到屈服点后,界面拉伸粘结性能较强的新拌材料(如 R4-T)继续变形,而基底粗糙度较低的其他情况则更早发生破坏。因此,在相同屈服水平下,一系列有涂层的圆柱样本的拉力峰值没有明显差异,但位移(临界位移和总位移)却差异显著。

2.3 3D 打印衬砌与围岩界面微观特性

有涂层和无涂层工况下, Panthera 软件三维重建的围岩表面孔结构如图 7 和图 8 所示。分析表明,相比于无涂层的界面,有涂层的圆柱试样与新拌材料之间界面的孔隙数量明显减少。这也验证了涂覆涂层是可以提高“围岩”基底与 3D 打印衬砌混凝土间粘结能力的。

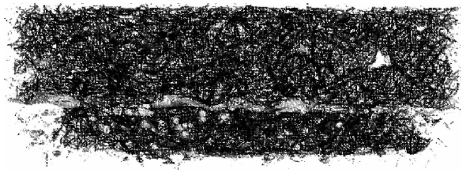


图7 Panthera 软件三维重建的围岩表面孔结构(无涂层)

Fig. 7 3D surrounding rock surface microstructure (without coating) reconstructed by Panthera software



图8 Panthera 软件三维重建的围岩表面孔结构(有涂层)

Fig. 8 3D surrounding rock surface microstructure (with coating) reconstructed by Panthera software

3 结语

通过试验模拟分析方法,对不同围岩条件下的 3D 打印衬砌-围岩界面力学性能进行了研究,并对其影响因素进行了分析,主要结论如下:

1) 围岩表面粗糙程度对隧道 3D 打印衬砌结构的施工质量有很大的影响。粗糙基底的宏观表面纹理并没有被 3D 打印混凝土充分填充,导致粗糙基底和打印层之间只有部分接触,从而降低了基底与 3D 打印混凝土间的粘结性能。而对于粗糙度较低的基底(如抛光基底),由于接触充分,提升了该粘结性能。但抛光基底无法提供足够的“互锁”效应。

2) 粗糙基底上涂覆涂层可以改善隧道 3D 打印衬砌结构的施工质量。在粗糙基底上涂覆涂层后,由于宏观纹理得到了填充,基底与 3D 打印混凝土间的粘结性能得到了改善。因此,表面涂覆是改善施工质量的有效手段之一。

3D 打印隧道衬砌-围岩界面粘结力学性能的研究可为未来的隧道衬砌 3D 打印施工提供重要的参考和借鉴。

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.
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.
- [2] 李建光. 城市轨道交通施工技术发展与展望[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 76.
LI Jianguang. Development of urban rail transit construction technology and prospect [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 76.
- [3] 向龙, 田志宇, 王俊, 等. 隧道施工因素对衬砌结构安全性影响评价研究[J]. 施工技术(中英文), 2021(16): 30.
XIANG Long, TIAN Zhiyu, WANG Jun, et al. Study on the influence of tunnel construction factors on the safety of lining structure[J]. Construction Technology, 2021(16): 30.
- [4] 徐景涛. 衬砌空洞对隧道结构承载力的影响规律研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
XU Jingtao. Study on the influence law of lining cavity on the bearing capacity of tunnel structure [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [5] 王兆明. 地下水对山岭隧道施工的影响及防治措施研究[J]. 工程建设与设计, 2021(2): 97.
WANG Zhaoming. Research on the influence of groundwater on mountain tunnel construction and the preventive measures [J]. Construction & Design for Project, 2021(2): 97.
- [6] 管锋, 魏度强, 雷金山, 等. 地层空洞影响下地铁盾构隧道衬砌结构响应试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 461.
GUAN Feng, WEI Duqiang, LEI Jinshan, et al. Experimental study on lining response of metro shield tunnel under the influence of ground cavity [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 461.
- [7] 李见伟, 胡瑶, 张伟, 等. 横琴杧洲隧道工程衬砌结构的耐久性与保护层厚度 [J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(2): 112.
LI Jianwei, HU Yao, ZHANG Wei, et al. Durability and the tunnel lining concrete steel protection layer of the Hengqin Mangzhou tunnel project [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2023, 30(2): 112.
- [8] 全朝红, 陈程, 龚术. 超声脉冲回波在隧道衬砌结构完整性检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(2): 197.
QUAN Zhaohong, CHEN Cheng, GONG Shu. Application of ultrasonic impact-echo method to detection of lining concrete quality [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(2): 197.
- [9] 蒋瑶, 蔡升宇, 何世钦, 等. 复合衬砌结构混凝土界面粘结性能试验研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 160.
JIANG Yao, CAI Shengyu, HE Shiqin, et al. Experimental study on interfacial bonding performance of concrete with composite lining structure [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12): 160.
- [10] 李会强. 初期支护作为主要承载结构的复合式衬砌适用性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
LI Huiqiang. Study on applicability of composite lining with primary support as main load-bearing structure [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.
- [11] LU B, WENG Y, LI M, et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 477.
- [12] SALET T A M, AHMED Z Y, BOS F P, et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13(3): 222.
- [13] PAUL S C, VAN ZIJL G P A G, TAN M J, et al. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects [J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24(4): 784.
- [14] TAO Y, LESAGE K, VAN TITTELBOOM K, et al. Influence of aluminum sulfate on mobility and adhesion of hydroxyethyl methyl cellulose in cement-based materials for tunnel linings [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 131: 104594.
- [15] BADUGE S K, NAVARATNAM S, ABU ZIDAN Y, et al. Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: a review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods [J]. Structures, 2021, 29: 1597.
- [16] 张俊儒. 隧道单层衬砌作用机理及设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
ZHANG Junru. Study on action mechanism and design method of tunnel single-layer lining [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [17] VAN DER PUTTEN J, DE SCHUTTER G, VAN TITTELBOOM K. Surface modification as a technique to improve inter-layer bonding strength in 3D printed cementitious materials [J]. RILEM Technical Letters, 2019, 4: 33.
- [18] YAZDI M A, DEJAGER E, DEBRAEKELEER M, et al. Bond strength between concrete and repair mortar and its relation with concrete removal techniques and substrate composition [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116900.
- [19] AVER'YANOVA I O, BOGOMOLOV D Y, POROSHIN V V. ISO 25178 standard for three-dimensional parametric assessment of surface texture [J]. Russian Engineering Research, 2017, 37(6): 513.
- [20] LAKROUT H, SERGOT P, CRETON C. Direct observation of cavitation and fibrillation in a probe tack experiment on model acrylic pressure-sensitive-adhesives [J]. The Journal of Adhesion, 1999, 69(3/4): 307.
- [21] DERKS D, LINDNER A, CRETON C, et al. Cohesive failure of thin layers of soft model adhesives under tension [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(3): 1557.

(下转第 192 页)

2) 在基坑施工期间,钻孔桩变形呈现先增大后减小的趋势,最大值出现在中部基坑(基坑 C 和基坑 D)开挖期间。钻孔桩越靠近高铁桥墩水平变形越大,同时外侧钻孔桩的水平位移要大于内侧钻孔桩。

3) 采用本文提出的多排钻孔桩+斜撑的加固方案后,基坑施工期间桥墩竖向位移和水平位移均小于 2 mm 限值的要求,证明该加固方案能够有效控制既有高铁桥墩的变形,满足高铁安全运营的要求。

参考文献

- [1] 李晓龙. 基坑开挖对邻近高铁桥墩的影响分析[J]. 现代城市轨道交通, 2016(2): 42.
- LI Xiaolong. Analysis on influence of excavation on adjacent bridge pier under high speed railway bridge[J]. Modern Urban Transit, 2016(2): 42.
- [2] 张仲宇, 李兆平, 杨航, 等. 并行基坑施工对邻近桥梁影响及保护措施[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 68.
- ZHANG Zhongyu, LI Zhaoping, YANG Hang, et al. Study on in-

fluence of parallel foundation pit construction on adjacent bridge and protection measures[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 68.

- [3] 何晟亚, 王志杰, 王恒一. 地铁基坑下穿城际铁路高架加固措施研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(2): 38.
- HE Shengya, WANG Zhijie, LI Hengyi. Study on reinforcement measures of metro foundation pits under intercity railway viaducts[J]. Modern Urban Transit, 2022(2): 38.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 58.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for deformation measurement of building and structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 58.

· 收稿日期:2023-06-28 修回日期:2023-09-12 出版日期:2024-03-10
Received:2023-06-28 Revised:2023-09-12 Published:2024-03-10

· 作者:李晓龙,高级工程师,514704364@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 181 页)

- [23] TAO Y, VANTYGHM G, LESAGE K, et al. Adhesion properties of printable polymer-modified concrete for rock tunnel linings[J]. ACI Materials Journal, 2021, 118(6): 61.
- [24] KACI A, BOURAS R, PHAN V T, et al. Adhesive and rheological properties of fresh fibre-reinforced mortars[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2): 218.
- [25] MOHAMED ABDELHAYE Y O, CHAUCHE M, VAN DAMME H. The tackiness of smectite muds. 1. The dilute regime[J]. Applied Clay Science, 2008, 42(1/2): 163.

- [26] MOHAMED ABDELHAYE Y O. Tackiness and cohesive failure of granular pastes: mechanistic aspects[J]. The European Physical Journal E, 2012, 35(6): 1.

· 收稿日期:2023-10-23 修回日期:2023-11-20 出版日期:2024-03-10
Received:2023-10-23 Revised:2023-11-20 Published:2024-03-10

· 作者:瞿锋,高级工程师,1323951174@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 187 页)

- [10] 刘涛, 刘红军. 青岛岩石地区基坑工程设计与施工探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 499.
- LIU Tao, LIU Hongjun. Design and construction of foundation pits in rock area in Qingdao[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 499.
- [11] 王江荣, 梁永平, 赵振学. 基于有限元分析的地铁车站明挖深基坑边坡稳定性分析[J]. 工程质量, 2019, 37(1): 54.
- WANG Jiangrong, LIANG Yongping, ZHAO Zhenxue. Slope stability analysis of open cut deep foundation pit of subway station based on finite element analysis[J]. Construction Quality, 2019, 37(1): 54.
- [12] 翟永亮. 地铁车站基坑桩撑支护体系 m 法设计参数研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- ZHAI Yongliang. Study on the M-method design parameter of

pile-internal bracing strut support system in subway station pit[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.

- [13] 王仁杰. 某桩锚支护深基坑三维有限元模拟及性状分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
- WANG Renjie. Three-dimensional finite element simulation and behavior analysis of a deep foundation pit supported by pile and anchor[D]. Hengyang: University of South China, 2013.

· 收稿日期:2021-12-10 修回日期:2022-03-18 出版日期:2024-03-10
Received:2021-12-10 Revised:2022-03-18 Published:2024-03-10

· 第一作者:杜岩,高级工程师,187276691@qq.com
通信作者:殷建国,高级工程师,yjgkyo@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license