

雄安新区深基坑双排桩支护的实践与探讨

Practice and Discussion of Double-row Piles Retaining Structure for Deep Excavation in Xiong'an New Area

赵玉成¹, 代兆宇¹, 夏瑞萌², 娄海成²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 为研究双排桩支护在雄安新区典型地层下的承载与变形特性, 指导后续工程建设, 以桩顶竖向位移、水平位移和桩体水平位移为主要分析项目。通过现场监测与软件计算的方式, 对双排桩支护方式在该地区地质条件下的响应特性进行了系统研究。结果表明: 双排桩桩顶竖向位移整体以隆起为主, 且前排桩隆起明显大于后排桩; 前排桩变形相比于后排桩的变形较大, 系梁存在受压或受拉两种状态; 基坑下半部分土体开挖阶段桩顶水平位移增长迅速; 前后排桩桩身变形形态受系梁的拉结作用明显, 具有明显差异。

关键词: 双排桩支护; 监测数据; 桩体位移; 冠梁刚度

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0079-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.015

ZHAO Yucheng¹, DAI Zhaoyu¹, XIA Ruimeng², LOU Haicheng²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: In order to study the bearing and deformation characteristics of double-row piles retaining structure under the typical stratum of Xiong'an New Area and guide the subsequent construction. A foundation pit project in the Xiong'an New Area, where double-row piles retaining structure was used for the first time, was taken as the research object, with vertical displacement of pile top, horizontal displacement of pile top and horizontal displacement of pile body as the main analysis items. The response characteristics of the double-row piles retaining structure method in the soil and water environment of the area were systematically studied by means of field monitoring and software calculation. The study shows that the vertical displacement of the top of the double-row pile is mainly elevated, and the elevation of the front-row pile is significantly larger than that of the back-row pile. The deformation of the front row piles is larger than that of the rear row piles, and the tie beam exists in two states of compression or tension. The horizontal displacement of pile tops in the excavation stage of the lower half of the foundation pit grows rapidly. The deformation patterns of the front and rear piles are significantly different by the tensile effect of the tie beam. The simplified model in the current calculation software is too simple, and both the calculated deformation values and deformation patterns are significantly different from the monitoring data.

Keywords: double-row piles retaining structure; monitoring data; pile displacement; top beam stiffness

作者简介: 赵玉成 (1969—), 男, 教授, 研究方向: 城市地下工程理论与应用。

通信作者: 夏瑞萌 (1983—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向: 地下工程设计。

收稿日期: 2023-06-09

0 引言

雄安新区正在按照“先地下，后地上”的建设时序，大规模开展地下空间的建设。在这一过程中，基坑工程的安全性、经济性和地层适用性成为了亟待系统研究的重点。双排桩作为一种成熟的支护手段，因其无需内支撑、可兼作抗浮桩基、无锚索留存等优点，是宽大基坑的主要支护方式之一，可确保地下工程建设安全有序开展^[1-2]。迄今为止，国内外学者已经对深基坑双排桩做过大量研究，从不同角度对双排桩的群桩体系的支护效果进行分析，双排桩实测数据的研究成果不断积累。夏曾银等^[3]总结了各种工况下基坑的破坏类型与变形规律，随着基坑开挖深度的增加，土体卸载作用增强，周边土对桩身的差异作用增大；Wang 等^[4]研究发现基坑周围土体与桩体结合成为桩-土复合体，改变了土压力-位移的应力路径，提高了土体的安全性；Zhou 等^[5-6]基于 Rankine 半无限土理论计算双排桩土压力，没有考虑桩土的相互作用，将桩周土体视为刚塑性体，导致土压力计算结果过大；胡杨等^[7]利用 BOTDA 技术结合深层位移监测，反推了双排支护桩的内力分布及变形特性；Zhu 等^[8]通过加固桩间土，显著减小了桩顶位移和桩身最大弯矩，加固效果随着加固深度的增加而减小，加固桩间土体只能提高土体自身的抗变形能力，不能改变桩-土相互作用，没有应力重分布；曹净等^[9]通过引入桩间土等效桁架模型，进而提出一种基坑双排桩支护结构的改进计算模型；Wang 等^[10-11]进行了双排桩模型试验，发现较小的桩间距与合适的排距可以提高基坑的稳定性；郑刚等^[12]研究了连系梁调节桩内力分布与传递荷载的性能；刘青松等^[13]通过综合考虑地层变化区域、桩顶荷载区域和支护段长度，改进了双排桩冠梁和连梁组合体系的刚度的计算方法；宫凤梧等^[14]将双排桩冠梁与连梁视为刚性连接，引入冠梁与连梁效应系数，得到了矩形双排桩冠梁横向支撑刚度系数。

以雄安新区至北京大兴国际机场快线项目为例，对雄安新区双排桩支护的某车站深基坑工程进行全面研究，重点对此地层条件下的支护结构变形特性进行系统分析，得到了双排桩支护在该地区水土环境下的响应特性。通过分析研究，期望得到更为合理、安全、

经济的双排桩支护方案，指导下阶段工程建设。

1 工程概况

1.1 项目概况

本基坑深度 25.47 m，宽度 52.5 m，结合场地现状 & 规划条件，主要采用上部放坡 + 下部双排桩支护方式，基坑平面布置图如图 1 所示。

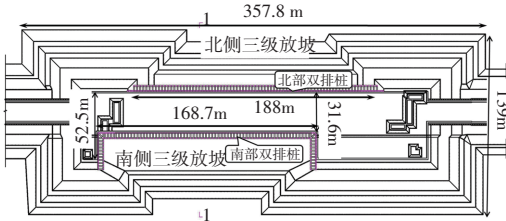


图 1 基坑平面布置
Fig. 1 Pit plan layout

支护结构参数为：基坑北侧上部三级放坡，总高度 14.61 m，各级坡比从上到下分别 1:1.4、1:1.1、1:1.13，分级高度分别为 6.61、5、3 m；各级边坡设 3.5 m 平台，三级边坡坡脚设置 8.5 m 平台，下部坑中坑深度为 10.65 m，前排桩采用 $\phi 800@1200$ ，后排桩采用 $\phi 800@2400$ ，连梁 800 mm $\times$ 800 mm，嵌固深度 13 m；基坑南侧上部三级放坡，总高度 12.21 m，分级高度分别为 4.21、5、3 m；各级边坡设 3.5 m 平台，三级边坡坡脚设置 8.5 m 平台，下部坑中坑深度为 10.65 m，前排桩采用 $\phi 800@1200$ ，后排桩采用 $\phi 800@2400$ ，排距 4 m，冠梁 800 mm $\times$ 800 mm，连梁 800 mm $\times$ 800 mm，嵌固深度 8.5 m。

1.2 工程地质条件

雄安新区地层以粉土、黏土及粉细砂互层为主，具体各层岩土层的主要物理及力学指标见表 1。

表 1 主要岩土物理力学参数
Table 1 Main geotechnical physical and mechanical parameters

地层名称	层厚/m	c /kPa	φ / (°)	承载力 特征值 /kPa	标准贯 入试验 /击	渗透 系数 K/ (m/d)	液性 指数 I_L
① ₂ 素填土	0.4~4.4	20.3	13.9	—	6.8	0.2	0.46
② ₁ 粉质黏土	0.5~7.3	17.3	20.0	110	7.8	0.4	0.40
② ₂ 黏质粉土	0.8~6.2	6.3	30.9	120	11.3	2.0	0.36
④ ₂ 黏质粉土	1.1~5.8	7.0	30.5	160	14.5	4.1	0.40
⑤ ₄ 粉质黏土	1.4~6.3	17.4	19.6	150	10.2	0.2	0.56
⑦ ₁ 粉细砂	0.7~7.4	5.4	32.4	240	42.9	12.0	—
⑦ ₄ 粉质黏土	3.3~14.8	26.9	18.3	190	15.9	0.3	0.36
⑧ ₄ 粉细砂	1.3~6.8	—	—	250	49.7	—	—

2 基坑开挖步骤与监测方案

2.1 基坑开挖步骤

采用明挖顺作法施工,基坑开挖在长度方向上共分为15个区段,西端先开挖,东端后开挖,而后东西两端向中间收槽,自西向东顺序拉槽施工。开挖时间为2021年12月15日,开挖至底板位置的时间为2022年5月25日。

2.2 基坑监测方案

支护结构变形是判断基坑工程是否安全稳定的直接反应,此基坑对地表沉降、土体深层水平位移、围护桩顶竖向位移、围护桩顶水平位移和桩体变形进行了系统监测,监测布置平面图如图2所示。

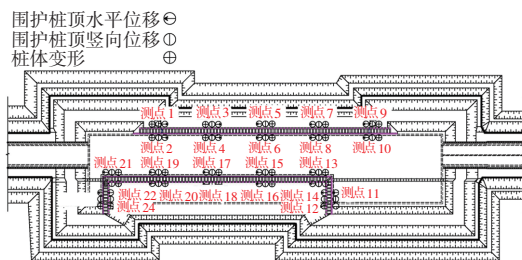


图2 监测总平面

Fig. 2 Monitoring the total plane

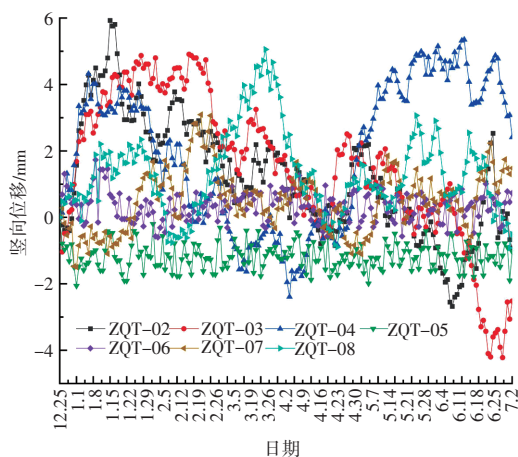
3 监测数据分析

3.1 桩顶竖向位移分析

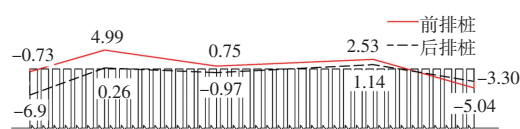
基坑开挖会使桩周损失摩阻力,从而引起竖向沉降,同时,基坑开挖也会造成大面积卸载,使坑底土体回弹裹挟桩基隆起。根据地层条件和开挖卸载体量的不同,桩基可呈现出沉降或隆起的最终变形形态。以北侧双排桩为例进行分析(如图3(a)),桩基整体以隆起为主,最终隆起量最大值为2.41 mm,施工过程中最大隆起量为5.93 mm,前后排桩隆起平均值为0.82 mm。同时前排桩隆起明显大于后排桩,这是由于前排桩基受基坑大面积卸载影响更大,而后排桩在前排桩的隔离作用下对卸载隆起效应相对不敏感。

北侧双排桩的竖向位移曲线如图3(b)所示,前后排桩整体呈现的变形变化趋势基本一致,但隆沉量值有所区别,前排桩隆起最大值为4.99 mm,后排桩最大沉降量为6.9 mm,前后排桩差异变形最大

值为6.17 mm,出现在双排桩最西侧的位置,这是由于基坑西端先行开挖,变形释放充分,且两侧四级放坡导致大面积卸载。位于中部的前排桩与后排桩桩顶竖向变形量值基本统一。



(a) 桩顶竖向位移历时曲线



(b) 桩顶竖向位移曲线/mm

图3 桩顶竖向位移曲线

Fig. 3 Vertical displacement curve of the top of the pile

3.2 桩顶水平位移分析

桩顶水平位移曲线如图4(a)所示。桩顶水平位移整体呈现出随土方开挖而不断增大的趋势,这是因为周边土对桩身的差异作用会随着工程的进行逐渐增大,导致桩顶侧移增加,各监测点桩顶水平位移最大终值位于13.42~20.89 mm之间。当基坑挖深约5 m时,桩顶水平位移变形开始出现陡增,直至开挖至坑底后变形达到基本稳定。桩顶水平位移较大的三处位于双排桩中部和边部,这是由于中部冠梁刚度最小以及边部存在大面积全放坡土方开挖导致。

对桩顶水平位移量值分布进行统计(如图4(b)所示),以正态曲线拟合此分布,以 $\mu \pm \sigma$ 作为分界线,桩顶水平位移分布在3.5~11.5 mm之间的占总桩数量的65%,该范围表征了此种支护条件下,桩顶水平位移的主要量值。

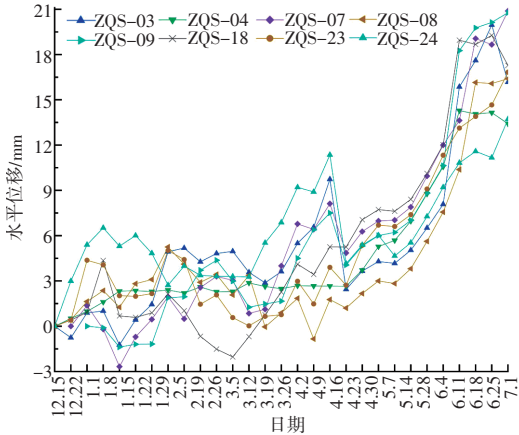
北侧双排桩前后排桩的水平位移曲线如图4(c)所示。最大前排桩桩顶水平位移值为6.25 mm,最大

岩土力学

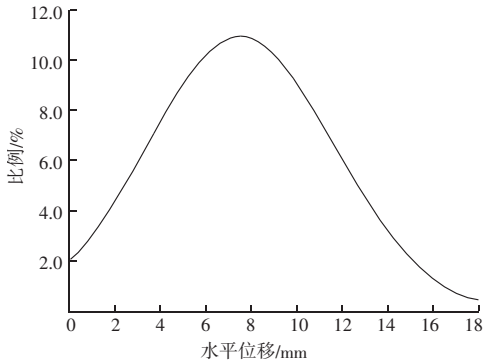
后排桩桩顶水平位移值为 7.25 mm。前排桩的桩顶水平位移整体较大，前后排桩的连系梁可能出现受压或受拉两种状态，前后排桩差异变形最大值为 11.35 mm。

个变形区段，桩体上部表现出受系梁拉结作用而产生的向基坑外侧的内凹曲线，桩体下部呈现出类似悬臂桩的变形形态。双排桩顶部刚架结构的刚度、开挖深度和施工工序都影响着它的变形特征，由于冠梁和连梁有效约束了前排桩顶部的位移，若深层水平位移不能被有效约束，随着开挖深度的增加，深层水平位移便会逐渐超过桩顶处的位移，出现“鼓肚式”的变形特征。桩顶水平位移与桩体最大水平位移较为接近，约为桩体最大水平位移的 0.79 倍，最大差值为 6.26 mm，位于南部双排桩最西侧。

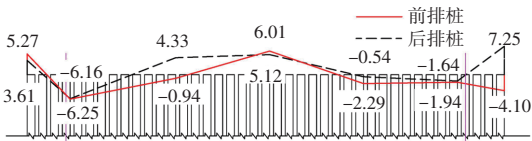
双排桩支护结构作为悬臂结构的一种，一般情况下，桩顶水平位移即为桩体最大水平位移，但受到前后排桩之间的连系梁约束，部分点位桩体水平位移最大值出现在了桩身上半部分，但整体上仍然呈现桩顶水平位移即为桩体最大水平位移的趋势。双排桩前排桩的侧向变形形态介于悬



(a) 桩顶水平位移历时曲线



(b) 桩顶水平位移终值分布



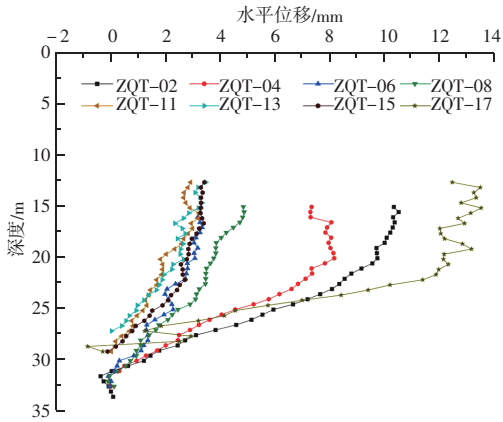
(c) 北侧双排桩桩顶水平位移曲线/mm

图 4 桩顶水平位移曲线

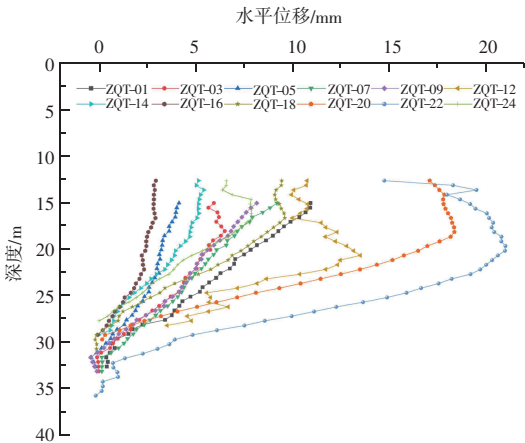
Fig. 4 Horizontal displacement curve of the top of the pile

3.3 桩体水平位移分析

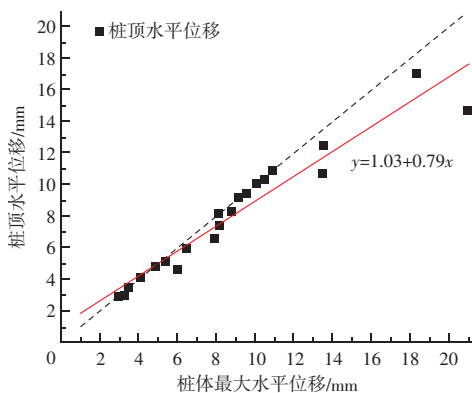
桩体水平位移如图 5 所示。前排桩桩体水平位移分布在 0 ~ 14 mm 的范围，最大值为 13.5 mm，出现在南部双排桩中间部位；前排桩呈现出向基坑外侧内凹的变形形态，与纯悬臂构件变形规律明显不同，系梁对前排桩的拉结作用明显。后排桩桩体水平位移分布在 0 ~ 22 mm 的范围，最大值为 20.9 mm，出现在南部双排桩西侧。后排桩桩体水平位移出现两



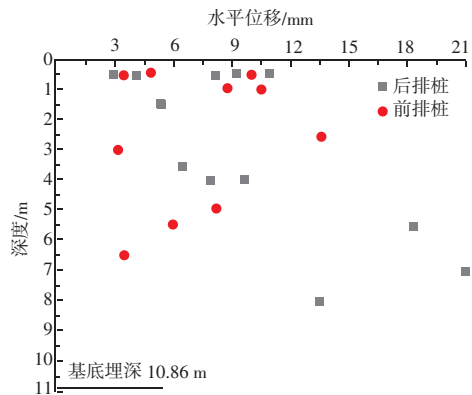
(a) 前排桩桩体深层水平位移



(b) 后排桩桩体深层水平位移



(c) 桩顶水平位移与桩体最大水平位移关系



(d) 桩体最大水平位移对应埋深

图 5 桩体水平位移曲线

Fig. 5 Pile Horizontal Displacement Curve

臂式和单支点式之间。当顶部连梁刚度较大、基坑较深且底板封闭较晚时，前排桩的变形趋近于单支点式，桩身深层水平变形超过桩顶。

桩体最大水平位移对应埋深如图 5 (d) 所示，桩体最大水平位移出现在坑顶 0.5 m 处的测点最多，其次是出现在深度 3~4 m 间的测点，整体变形较小，最大为 9.56 mm，平均为 6.78 mm。通过观察桩体最大水平位移与深度的关系，可以看出前排桩出现桩体最大水平位移的深度浅于后排桩。

4 结论

以雄安新区双排桩支护为研究对象，深入分析桩顶水平位移、竖向位移和桩体水平位移的监测结果，得到以下几点结论：

(1) 双排桩桩基整体以隆起为主，且前排桩隆起明显大于后排桩，前后排桩桩顶竖向位移整体呈现的变形变化趋势基本一致。

(2) 前排桩的桩顶水平位移整体较大，系梁

可能出现受压或受拉两种状态，位移土方开挖而不断增大。当基坑挖深达到约 5 m 时，桩顶水平位移变形速率加大，施工中应加强对此阶段的监控量测工作，合理确定单次开挖土方工程量，动态施工。

(3) 前排桩桩体水平位移受系梁拉结作用明显，全深范围呈现出向基坑外侧内凹的变形形态，而后排桩桩体上部表现出受系梁拉结作用而产生的向基坑外侧的内凹曲线，桩体下部呈现出类似悬臂桩的变形曲线。

参 考 文 献

- [1] 何君佐, 刘浩, 聊少明, 等. 双排桩支护下深基坑与紧邻地铁车站相互作用 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (增刊 2): 821-831.
- [2] 蒋宏鸣, 刘春林. 深基坑双排桩支护的设计与变形监测研究 [J]. 岩土工程技术, 2022, 36 (2): 87-92.
- [3] 夏曾银, 郑刚, 邓旭, 等. 天津某半逆作法基坑结构柱隆起变形实测分析 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2022, 54 (5): 657-664, 790.
- [4] WANG Y, YANG Y T, YU F, et al. Analysis of the effects on optimization design about double-row piles retaining structure [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012: 72-78.
- [5] ZHOU Y J, LUO L R, ZHENG L X. Review of the deformation mechanism and earth pressure research on the double-row pile support structure [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 1-5.
- [6] ZHOU Y J, YAO A J, LI H B, et al. Correction of earth pressure and analysis of deformation for double-row piles in foundation excavation in Changchun of China [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 1-10.
- [7] 胡杨, 郭通达, 龙万学, 等. 基于 BOTDA 分布式光纤传感技术的双排圆形桩变形特性及内力研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2021, 53 (5): 692-699.
- [8] ZHU Q K. The influences of interpile soil reinforcement on the performance of structures with double-row Piles [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012: 195-198.
- [9] 曹净, 钱国伟, 杨泽帅, 等. 基于等效桁架模型的基坑双排桩结构计算模型研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38 (6): 943-949.
- [10] WANG Y, XIA X, WU Y. Model experimental study on support structure of double-row piles in deep foundation pit [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267: 1-5.
- [11] YU F. Performance of double-row piles retaining excavation beneath existing underground space [J]. (下转第 95 页)

于斜下侧穿的沉降值。②受力：相较于环向受力，结构受到的纵向扰动应力最大；净距减小，纵向拉应力增大；当截面尺寸依次增大时，既有电缆隧道产生的纵向拉应力依次增大；垂直下穿产生的拉应力值高于斜下侧穿产生的拉应力值。

(2) 既有电缆隧道安全性影响规律：随着两隧道净距缩短，既有结构的最小安全系数变小；当既有结构的截面尺寸依次增大时，既有结构的最小安全系数依次减小。垂直下穿产生的最小安全系数低于斜下侧穿产生的最小安全系数。

(3) 在地铁暗挖隧道垂直下穿既有电缆隧道（埋深 5m）时，建议电缆隧道的安全保护距离建议为大于 1.6 倍的电缆隧道洞宽，斜下 45°平行侧穿建议为大于 1.1 倍的电缆隧道洞宽。

(4) 空间位置关系、截面尺寸、净距对既有电缆隧道结构安全性的影响规律为：垂直下穿高于水平斜下 45°侧穿，既有电缆隧道断面尺寸越大，受扰动影响程度越大，隧道净距越小，影响程度越大。

参 考 文 献

- [1] BYUN G W, KIM D G, LEE S D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21 (1): 1-6.
- [2] KASPER. T, MESCHKE G A. 3D finite element simulation model for TBM tunneling in soft ground [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28: 1441-1460.
- [3] 包德勇. 近距离交叠隧道施工影响的数值模拟 [J]. 地下空间

与工程学报, 2011, 7 (1): 127-132.

- [4] 李俊光, 黄鑫, 杨小礼. 城市隧道下穿电缆隧道时的数值计算分析及变形沉降预测 [J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5 (1): 68-71.
- [5] 崔光耀, 戴艾蒙, 克旭, 等. 复合地层双线矩形隧道近接下穿高铁三维影响分区及应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (增刊 2): 3609-3620.
- [6] 王占生, 张顶立. 浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (增刊 2): 4208-4214.
- [7] 郑光辉, 李结元, 王攀, 等. 盾构近距离下穿既有隧道掘进参数试验研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (19): 122-127, 144.
- [8] 廖少明, 杨宁恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (5): 812-818.
- [9] 代光辉, 周学, 李清泽, 等. 新建隧道近接下穿地铁区间的沉降影响分析 [J]. 路基工程, 2023 (4): 150-153.
- [10] 麻凤海, 董博, 宋帅, 等. 大跨度人防隧道工程下穿施工对既有地铁隧道区间结构稳定性的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (4): 33-39.
- [11] 汪从敏, 程国开, 王志勇, 等. 新建隧道对既有电缆隧道的影响规律及保护区范围分析 [J]. 地下工程与隧道, 2016 (3): 15-18.
- [12] 向卫国, 徐玉胜, 江辉煌, 等. 隧道施工引起地下管线变形的安全评估 [J]. 铁道建筑, 2010 (7): 70-73.
- [13] 冯慧君. 新建地铁隧道近距离下穿运营地铁线路施工及安全管控 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (2): 220-226.
- [14] 李友武, 张基伟, 江潮, 等. 下穿既有铁路隧道施工安全技术分析 [J]. 重庆建筑, 2024, 23 (增刊 1): 102-104.
- [15] 于磊. 电缆隧道施工对邻近地下管线的影响研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
- [16] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

(上接第 83 页)

- International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2018, 19: 1-4.
- [12] 郑刚, 衣凡, 黄天明, 等. 超挖引起双排桩支护基坑倾覆型连续破坏机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (8): 1373-1381.

- [13] 刘青松, 矫伟刚, 盛志战. 双排桩冠梁刚度分析及抗倾覆优化计算 [J]. 工程勘察, 2020, 48 (6): 19-23.
- [14] 宫凤梧, 刘晨, 郭文娟, 等. 双排桩双梁组合支护刚度计算的改进与位移分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49 (1): 109-116.