

新建航道基坑下穿高铁桥梁对邻近桥墩的影响分析*

李晓龙

(上海东华地方铁路开发有限公司, 200071, 上海)

摘要 [目的] 新建航道基坑下穿高铁桥梁时, 基坑开挖卸载会引起桥梁周边土体产生位移, 进而影响高铁桥梁。为确保高铁线路的运营安全, 需对新建航道基坑下穿高铁桥梁时对邻近桥墩的影响进行分析。[方法] 以京杭大运河新建航道基坑下穿沪昆高铁工程为背景, 基于有限元模拟和现场实测, 分析了航道基坑施工对既有高铁桥墩的影响, 评估了航道基坑工程采用多排钻孔桩 + 斜撑加固方案的可行性和效果。[结果及结论] 航道基坑施工主要会引起高铁桥墩产生顺桥向的水平变形, 建议采取措施适当增大顺桥向刚度; 钻孔桩越靠近高铁桥墩, 其水平位移越大, 随着航道基坑的施工, 钻孔桩水平位移呈现先增大后减小的趋势; 采取多排钻孔桩 + 斜撑的加固方案后, 桥墩变形小于相应规范规定的 2 mm 限值要求, 满足列车安全运营的要求。

关键词 高铁桥梁; 航道开挖; 桥墩位移; 基坑加固

中图分类号 U443.22

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.034

Influence Analysis of Newly-built Channel Foundation Pit Under-passing High-Speed Railway Bridge on Adjacent Piers

LI Xiaolong

(Shanghai Donghua Local Railway Development Co., Ltd., 200071, Shanghai, China)

Abstract [Objective] When a new channel foundation pit under-passes a high-speed railway bridge, the excavation and unloading of the foundation pit will cause the displacement of the soil surrounding the bridge, and further affect the high-speed railway bridge. In order to ensure the operation safety of the high-speed railway line, it is necessary to analyze the influence of the foundation pit under-passing the bridge on the adjacent piers. [Method] With the project of the new channel foundation pit of Beijing-Hangzhou Grand Canal under-passing the Shanghai-Kunming High-speed Railway bridge as the background, based on finite element simulation and on-site measurement, the influence of foundation pit construction on the existing high-speed railway piers is analyzed. The feasibility and effect of the scheme adopting multiple rows of bored piles + in-

clined brace reinforcement for the foundation pit construction are evaluated. [Result & Conclusion] As the channel foundation pit construction causes horizontal displacement of the high-speed railway piers along the bridge, it is proposed to take proper measures to increase the stiffness along the bridge. The closer the bored pile is to the high-speed railway pier, the larger the horizontal displacement. With the construction of the channel foundation pit, the horizontal displacement of the bored pile shows the trend of increasing first and then decreasing. The displacement of piers under the reinforcement scheme of multiple rows of bored piles + inclined brace is less than the 2mm limit required by the relevant standard, meeting the requirements for train operation safety.

Key words high-speed railway bridge; channel excavation; pier displacement; reinforcement of foundation pit

随着长三角地区经济的高速发展, 航道运量快速增长但航道通过能力却严重不足。为了缓解该矛盾, 国家加快建设长江三角洲地区高等级航道网。在高铁分布较为密集的长三角地区, 航道下穿高铁已成为网络化交通的必然结果。然而, 航道基坑开挖卸载势必会引起周边土体产生位移, 进而影响高铁桥梁等邻近建构筑物^[1]。如何确保在航道施工期间高铁线路的运营安全是一个亟待解决的问题。

文献[2]运用有限元软件, 分析邻近桥梁桩基的基坑开挖对既有结构的影响。文献[3]以深圳地铁 12 号线和平站主体基坑下穿穗莞深城际铁路高架为项目依托, 通过有限元模型, 分析了无加固、隔离桩加固、旋喷桩土体加固以及结合隔离桩与旋喷桩土体加固等 4 种保护措施对既有结构的保护效果。而针对下穿高铁桥梁的航道基坑施工, 国内外学者在航道基坑开挖对既有结构的影响方面却鲜有研究。

本文以京杭大运河三级航道整治工程新建航

* 中国铁路上海局集团有限公司科研课题(2023-100-01)

道基坑下穿沪昆高铁工程为例,制定下穿段的抗扰动加固方案,并基于该工程建立三维有限元模型,针对不同施工阶段模拟分析土体和桥墩的变形规律,最后基于监测的实测数据分析支护结构和桥墩变形特征,验证加固方案的可行性。

1 工程概况

京杭大运河(浙江段)三级航道整治工程在杭州与嘉兴的边界附近下穿沪杭高铁桥,设计新建三级航道采用复式梯形断面,顶面宽 60 m,下底宽 45 m,下穿沪昆高速铁路桥孔段航道开挖深度约 7 m。高铁桥梁为 48 m+80 m+48 m 三跨连续梁,无砟轨道,设计速度为 350 km/h。高铁线路和京杭运河航道夹角为 72°,航道基坑开挖边界距高铁桥墩的最小距离不足 3 m。受影响桥墩为中墩 232#和 233#两个桥墩,桥墩横截面为圆端形,桥墩高度为 19.5 m,墩底尺寸为 4.5 m(顺桥向)×9.0 m(横桥向),承台尺寸为 14.3 m×14.3 m×3.5 m。每个桥墩下设 16 根桩基,桩径为 1.5 m,桩长为 67 m。根据现场地质勘查报告,场地土层主要为粉质黏土和淤泥质黏土,地下水位埋深为 1.1~4.9 m。表 1 为该场地土体的主要物理力学参数。

表 1 土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil mass						
土层	厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	压缩 模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)	泊 松 比
(1) ₁ 黏土	2.4	19.4	2.41	22.8	16.3	0.40
(2) ₁ 淤泥 质黏土	9.5	19.3	1.55	23.8	12.2	0.38
(3) ₁₋₃ 粉 质黏土	8.4	18.8	2.37	10.9	9.8	0.30
(3) ₂ 淤泥 质黏土	4.1	18.9	2.10	11.0	5.7	0.38
(4) ₁ 黏土	5.9	19.6	2.58	23.5	16.3	0.40
(4) ₂ 粉质 黏土	12.7	19.7	4.97	7.9	10.8	0.38
(5) ₁ 黏土	8.4	19.5	5.98	28.4	16.9	0.40
(5) ₂ 黏土	10.2	19.6	7.14	27.6	16.5	0.40
(5) ₃₋₂ 粉细砂	4.3	19.8	8.92	13.7	17.2	0.20

为保护既有高铁线路,该基坑拟采用多排钻孔桩+斜撑进行加固处理。其中多排钻孔桩布置在沪昆高速铁路两侧各 45 m 范围内,共设置 6 排直径 1.2 m(桩间距 1.4 m)钻孔桩,232#和 233#桥墩之间 4 排钻孔桩深度为 28 m,桥墩外侧 2 排钻孔桩

深度为 30 m。根据钻孔桩的位置,将该基坑分为两侧斜撑基坑(基坑 A 和基坑 B)、中部基坑(基坑 C 和基坑 D)和航道基坑(基坑 E),如图 1 所示。除基坑 E 之外其余基坑钻孔桩采用 1.0 m×1.0 m、水平间距 6.0 m 钢筋混凝土横撑连接形成整体。基坑 A 和基坑 B 所在钻孔桩采用 1.0 m×1.0 m、水平间距 6.0 m、坡率 1:4 斜撑进行加固,并且连接基坑 C 和基坑 D 外侧钻孔桩形成永久支护结构。基坑 C 和基坑 D 竖向设置 2 道横撑,间距 3 m,同时采用长度 10 m 的水泥搅拌桩进行地基加固。航道基坑(基坑 E)设置 1.0 m×1.0 m、水平间距不大于 15.0 m 钢筋混凝土纵横锚梁,并利用斜锚梁形成“米”字形格构。在基坑 C、D 和 E 底部设置 1.5 m 厚钢筋混凝土底板,在紧贴航道边线设置防撞墙,墙底采用长 15 m、直径 1 m 桩基础。河底采用 0.4 m 厚混凝土铺砌,两端设置垂裙,如图 2 所示。

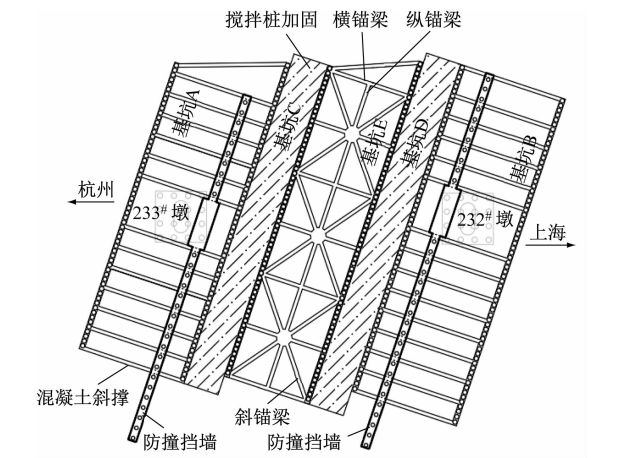


图 1 工程平面图
Fig. 1 Project plan

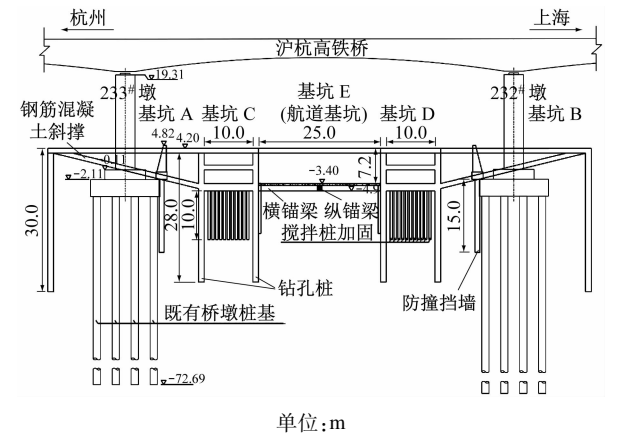


图 2 围护结构标准横断面图
Fig. 2 Standard cross section of the retaining structure

2 数值模拟与结果分析

2.1 有限元模型的建立

使用 PLAXIS 3D 有限元软件,对该新建航道基坑施工进行有限元模拟。为减小边界效应,模型的尺寸应选取基坑围护结构尺寸的 3~5 倍,因此有限元模型尺寸为 300 m×150 m×100 m(顺桥向×横桥向×深度)。根据施工计划,将该有限元模型分为 10 个工况进行计算,分别为:围护结构施工;横撑施工;承台上方土体开挖;斜撑施工;基坑 C、基坑 D 开挖到 4 m 深;基坑 C、基坑 D 架设第二道横撑并开挖至坑底;基坑 C、基坑 D 底板施工;航道基坑 E 开挖;拆除横撑,截断围护桩至设计高程,铺砌河床;河道通水。

2.2 数值结果分析

2.2.1 桥墩竖向位移

上述各工况下桥墩累计竖向位移如图 3 所示。其中,233#和 232#桥墩墩顶和承台的竖向位移几乎完全相同,同时两桥墩竖向位移趋势一致,都为先下沉后上浮。在围护结构施工(工况 1)期间,由于桥墩侧向土压力的释放,导致桥墩产生一定的沉降变形。承台上方土体开挖(工况 3)期间释放承台顶原有土压力,造成桥墩上浮,其后基坑开挖工况由于不在桥墩正上方,并且有钻孔桩的存在,对桥墩竖向变形影响较小。在工况 8 下,桥墩竖向累计上浮位移达到最大值,232#桥墩竖向位移最大值为 0.82 mm,233#桥墩竖向位移最大值为 0.74 mm。

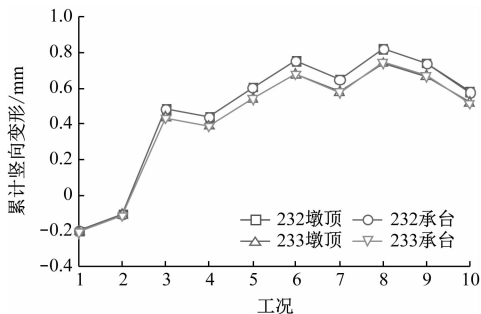


图 3 各工况下桥墩累计竖向位移

Fig. 3 Cumulative vertical displacement of piers under various working conditions

2.2.2 桥墩水平位移

各工况下桥墩的累计水平变形如图 4 所示。由图 4 可知,233#和 232#两个桥墩整体向基坑侧倾斜,并且随着基坑的施工,顺桥向水平位移逐渐增大,在航道通水(工况 10)之后,在水侧压力作用下,桥

墩水平位移有所减小。对比桥墩墩顶和承台的数据发现,墩顶水平变形大于承台,原因是桥墩较高,且桥墩本身刚度较大,对基础变形敏感。桥墩的顺桥向水平位移要远大于横桥向水平位移。

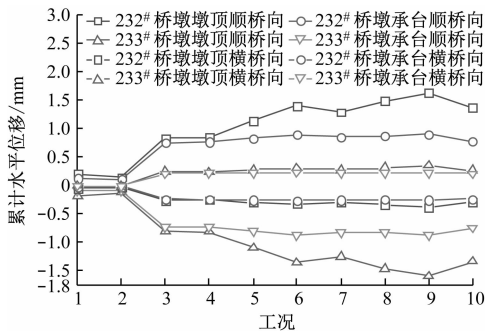


图 4 各工况下桥墩累计水平位移

Fig. 4 Cumulative horizontal displacement of piers under various working conditions

3 现场监测与数据分析

3.1 监测方案

为保证航道基坑施工过程中高铁线路的安全,同时验证加固方案的实际效果,对航道基坑支护结构和既有桥墩进行现场监测,其中:钻孔桩深层水平位移监测点 21 个(CX1—CX21),桩顶水平位移监测点 36 个(QD1—QD36),既有桥墩沉降监测点和水平位移监测点 4 个(Q233-1、Q233-2、Q232-1 和 Q232-2)。上述监测点布置如图 5 所示。高速铁路桥桥墩沉降和水平位移限值为 2 mm。桩深层水平位移限值为 32 mm,围护桩顶部水平位移限值为 14 mm^[4]。

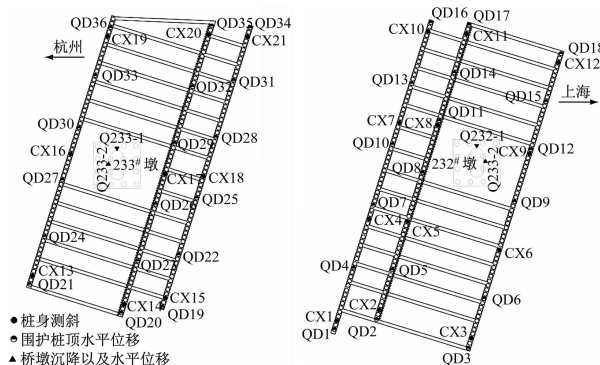


图 5 监测点位平面布置图

Fig. 5 Layout of monitoring and measuring points

3.2 实测数据分析

3.2.1 有限元模型验证

为证明本文所建立有限元模型的准确性,选取

CX18 测点的深层水平位移最大值进行对比,结果如图 6 所示。由图 6 可知,实测值与有限元模型计算结果较为吻合,证明了数值模型的准确性。

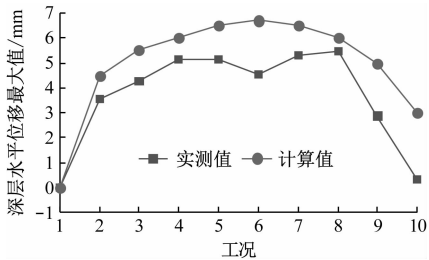


图6 CX18 测点深层水平位移

Fig. 6 Deep horizontal displacement at measuring point CX18

3.2.2 钻孔桩深层水平位移

钻孔桩深层土体水平位移最大值时程曲线如图 7 所示。由图 7 可见,钻孔桩深层土体水平位移随着基坑的开挖先增大后减小,最大值出现在施作基坑 C 和 D 时间段内。对比不同测斜点的数据可以看出,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的,这是因为在基坑 B 外侧的钻孔桩始终受到墙后土压力的作用,而内侧基坑钻孔桩在基坑 E 开挖完成后,不再受到土压力的作用。由图 7 可知,钻孔桩的最大水平位移为 6.88 mm,小于规范限值(32 mm)^[4],证明施工期间,钻孔桩的深层水平位移在安全范围内。

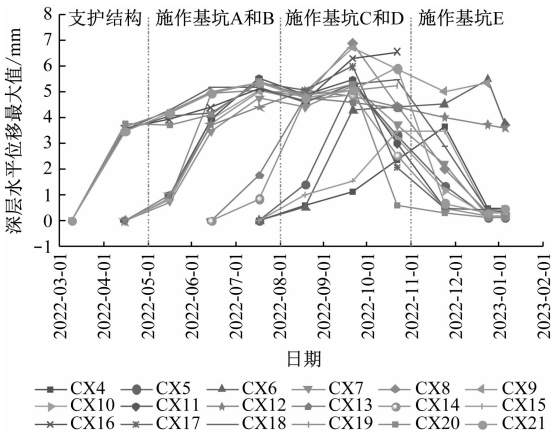


图7 深层水平位移最大值时程曲线

Fig. 7 Time history of maximum deep horizontal displacement

3.2.3 钻孔桩顶部水平位移

由于左侧基坑 A、C 和右侧基坑 B、D 所在的桩顶水平位移变形规律大致相同,选取基坑 B 和 D 中

的数据进行分析。桩顶水平位移的时程曲线如图 8 所示。由图 8 可见:基坑 B 的外侧钻孔桩在开挖期间顶部水平位移快速增长,之后趋于稳定;内侧钻孔桩桩顶水平变形随着基坑开挖不断增大,并且在基坑 E 开挖期间,其水平位移快速增长,明显大于外侧钻孔桩的。由图 8 可知,桩顶水平位移最大值为 1.4 mm,小于规范限值要求(14 mm)^[5],证明基坑施工期间桩顶部变形在安全范围内。

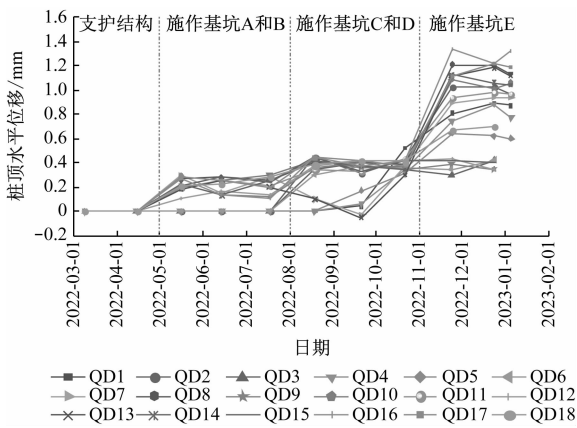


图8 桩顶水平位移时程曲线

Fig. 8 Time history of horizontal displacement of pile top

3.2.4 高铁桥墩位移

高铁桥墩各个监测点累计变形的最大值如表 2 所示。由表 2 可见,桥墩累计沉降和累计水平位移均小于规范要求限值(2 mm)^[4],证明该加固方案可有效保护既有结构,确保基坑施工期间沪昆高铁的运营安全。

表 2 桥墩累计位移量最大值			
Tab.2 Maximum cumulative displacement of bridge piers			
测点	竖向位移/ mm	顺桥向水平 位移/mm	横桥向水平 位移/mm
Q232-1	0.40	0.53	-0.50
Q232-2	0.35	0.45	-0.48
Q233-1	0.40	-0.46	0.40
Q233-2	0.40	-0.53	0.48

注:“-”表示位移方向相反。

4 结论

1) 航道基坑下穿高铁桥梁施工引起的桥墩变形主要是顺桥向水平位移,横桥向水平位移和竖向位移较小,因此应适当增加顺桥向整体刚度,以减小桥墩顺桥向变形。

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