

基坑围护桩作用下地层支护应力分析及应用^{*}

吴行州

(中铁二十三局集团第四工程有限公司, 610073, 成都)

摘要 [目的] 基坑围护桩在建筑施工中起着至关重要的作用。为确保基坑施工安全稳定地进行, 需对基坑在围护桩支护作用下的地层支护应力分布规律进行深入研究。[方法] 提出了围护桩作用下地层内部支护分析模型及理论计算公式, 基于弹性力学半弧线平面内作用均布应力的解答方法, 推导分析了不同围护桩间距下, 桩间土体内部支护应力的分布规律, 揭示了基坑围护桩下, 桩间土体内部成拱的力学机理。以济南轨道交通4号线林家庄站为例, 对围护桩作用下的地层支护应力进行了计算分析。[结果及结论] 在桩侧土压力作用下, 周边地层支护应力随桩间距的增大而减小; 在相同桩间距下, 周边地层支护应力随桩侧土压力的增大而增大。地层内部连续的支护应力与合理桩间距是确保围护桩有效成拱的关键。

关键词 基坑; 围护桩; 地层支护应力

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.022

Analysis and Application of Stratum Support Stress Under Action of Foundation Pit Retaining Pile

WU Xingzhou

(China Railway 23rd Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., 610073, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Foundation pit retaining piles play a vital role in building construction. In order to ensure the safety and stability of foundation pit construction, it is necessary to make in-depth study on the stress distribution law of stratum support under the action of foundation pit retaining piles.

[Method] The analysis model and theoretical calculation formula upon the stratum internal support under the action of retaining piles are put forward. Based on the solution method of the uniform stress in the half-arc plane of elasticity, the distribution law of soil internal support stress between piles is deduced and analyzed under different retaining pile distances. The mechanical mechanism of the soil arch between the piles and under the foundation pit retaining piles is revealed. The stratum support

stress under the action of the retaining piles is calculated and analyzed with the example of Linjiazhuang Station on Jinan Metro Line 4. [Result & Conclusion] Under the pile side soil pressure, the support stress of the surrounding stratum decreases with the increase of pile distance. At the same pile spacing, the support stress of surrounding stratum increases with the increase of pile side soil pressure. The continuous support stress inside the stratum and reasonable pile spacing are the key to ensure effective arch formation of the retaining piles.

Key words foundation pit; retaining pile; stratum support stress

目前, 随着我国社会经济的高度发展与城市化进程的不断推进, 城市高层和地下空间的利用越来越普遍, 随之涌现出一大批深基坑工程。在软土地层基坑中, 围护桩具有较高的承载强度, 可为基坑侧壁土体提供稳定的支撑, 目前在基坑工程中得到越来越广泛的应用。

常见的基坑围护桩包括混凝土围护桩、型钢桩、钢管桩、型钢水泥土搅拌桩、钢板桩等类型。国内外学者围绕围护桩的承载力学特性与施工工艺开展了大量研究。文献[1]依托微型钢管桩加固既有基础托换工程, 实测不同间歇时长情况下桩身温度与应力等的变化规律, 探讨不同运行模式下的桩基性能参数。文献[2]通过设计一种直剪式复合结构的拟静力加载试验装置, 研究了微型钢管桩-土复合抗滑结构(以下简称“桩土复合结构”)在地震作用下的耗能特性。文献[3]以上海典型软土地层为背景, 采用理论分析方法研究了型钢-水泥土相互作用与承载变形性状, 并与实测工程数据进行了对比。

对围护桩而言, 由于采用间隔设置, 桩与桩之间沿土体表面是非连续的。设置合理的桩间距, 使得桩间土体内部有效成拱是确保基坑围护桩安全

^{*} 国家自然科学基金项目(52374093); 中国博士后科学基金项目(2022M711314); 山东省自然科学基金(ZR2022ME088); 济南市科研带头人工作室项目(202333054)

使用的关键。JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》针对桩间土也给出了采用内置钢筋网的喷层护表技术。国内外学者对于桩间土体成拱效应开展了大量研究。文献[4]在合理拱轴线的假定下建立了土拱力学模型,推导形成了拱脚在极限平衡状态下土拱极限跨度表达式,分析了土拱拱高随土层深度的演化规律。文献[5]分析了桩间水平土拱对桩间墙组合结构受力的影响,推导了考虑土拱效应时该组合结构中抗滑桩和挡土墙的受力计算方法。文献[6]通过简化摩阻力分布的形式,建立了悬臂式抗滑桩桩间距的计算公式,研究了滑坡体的黏聚力、滑坡推力及抗滑桩的截面尺寸等因素对桩间距的影响。文献[7]采用数值模拟方法分析了桩截面尺寸对土拱性状的影响,结合力学计算解释了土拱类型及土拱高度变化的原因。

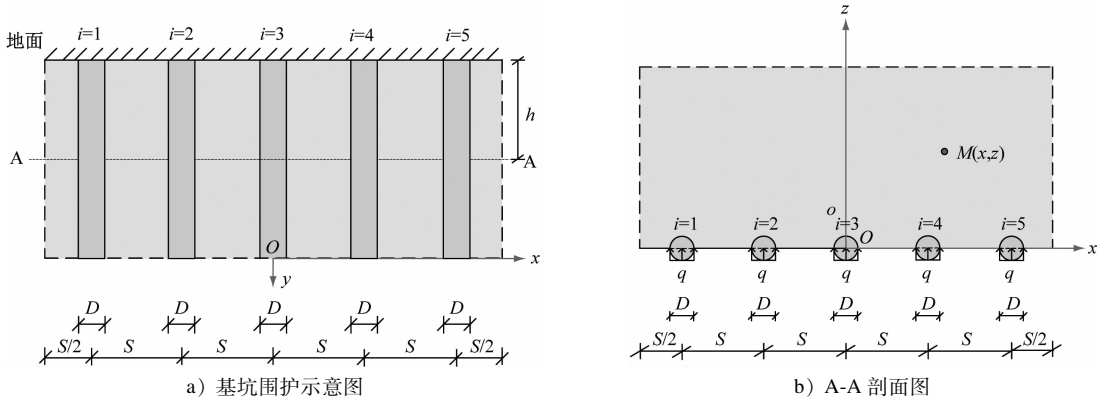
由于影响基坑围护桩支护力学性能的因素众多,需对围护桩的支护力学效应做进一步深入研究。本文在现有研究基础上,考虑基坑围护桩对地层产生的支护应力影响,提出了相对应的支护力学

分析模型,并计算得到了基坑围护桩作用下地层的支护应力理论计算公式,分析了不同桩间距参数对地层支护应力的影响规律,可为基坑围护桩设计及施工提供理论参考。

1 基坑围护桩作用下地层支护应力计算

本文考虑基坑围护桩的支护形式,沿基坑开挖边界任取 5 根围护桩,提出了围护桩作用下地层力学分析模型,如图 1 所示。图 1 中围护桩从左往右编号依次为 $i=1,2,3,4,5$,相对应的围护桩的中心距为 S ,围护桩的直径为 D 。

根据图 1 b),假设 h 处对应的侧向土压力为 q ,该部分土压力将由围护桩共同承担,相对应作用于每根围护桩的土压力也为 q 。根据力的相互作用原理,围护桩作用于桩土接触面的均布压力为 q ,围护桩对土体的支护作用可简化为作用于桩土接触面的均布压力 q 。在图 1 b)中,根据弹性力学^[8-10]中半弧线平面内作用均布应力的解答,可分别求得图 1 中 5 根围护桩对地层产生的支护应力。



注: h 为基坑深度; q 为深度 h 处对应的侧向土压力; $M(x, z)$ 为深度 h 处对应平面内的任意一点。

图 1 围护桩作用下地层支护力学分析模型

Fig. 1 Mechanical analysis model for stratum support under the action of retaining piles

第 1 根围护桩对土体内任意一点 $M(x, z)$ 产生的支护应力 σ_{z1} 为:

$$\sigma_{z1} = \frac{2q}{\pi} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{z^3}{[(2S+x-\xi)^2+z^2]^2} d\xi = \frac{q}{\pi} \left(\arctan \frac{\frac{D}{2} - 2S - x}{z} + \arctan \frac{\frac{D}{2} + 2S + x}{z} \right) - \frac{Dqz \left[(2S+x)^2 - z^2 - \frac{D^2}{4} \right]}{\pi \left[\left((2S+x)^2 + z^2 - \frac{D^2}{4} \right)^2 + D^2 z^2 \right]} \quad (1)$$

式中:

ξ ——均布力作用范围。

同理,可求得其余 4 根围护桩对土体内任意一点 $M(x, z)$ 产生的支护应力 $\sigma_{z2} - \sigma_{z5}$ 分别为:

$$\sigma_{z2} = \frac{2q}{\pi} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{z^3}{[(S+x-\xi)^2+z^2]^2} d\xi = \frac{q}{\pi} \left(\arctan \frac{\frac{D}{2} - S - x}{z} + \arctan \frac{\frac{D}{2} + S + x}{z} \right) - \frac{Dqz \left[(S+x)^2 - z^2 - \frac{D^2}{4} \right]}{\pi \left[\left((S+x)^2 + z^2 - \frac{D^2}{4} \right)^2 + D^2 z^2 \right]} \quad (2)$$

$$\sigma_{z3} = \frac{2q}{\pi} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{z^3}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi =$$

$$\frac{q}{\pi} \left(\arctan \frac{\frac{D}{2} - x}{z} + \arctan \frac{\frac{D}{2} + x}{z} \right) -$$

$$\frac{Dqz \left[x^2 - z^2 - \frac{D^2}{4} \right]}{\pi \left[\left(x^2 + z^2 - \frac{D^2}{4} \right)^2 + D^2 z^2 \right]} \quad (3)$$

$$\sigma_{z4} = \frac{2q}{\pi} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{z^3}{[(x-S-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi =$$

$$\frac{q}{\pi} \left(\arctan \frac{\frac{D}{2} - x + S}{z} + \arctan \frac{\frac{D}{2} + x - S}{z} \right) -$$

$$\frac{Dqz \left[(x-S)^2 - z^2 - \frac{D^2}{4} \right]}{\pi \left[\left((x-S)^2 + z^2 - \frac{D^2}{4} \right)^2 + D^2 z^2 \right]} \quad (4)$$

$$\sigma_{z5} = \frac{2q}{\pi} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \frac{z^3}{[(x-2S-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi =$$

$$\frac{q}{\pi} \left(\arctan \frac{\frac{D}{2} - x + 2S}{z} + \arctan \frac{\frac{D}{2} + x - 2S}{z} \right) -$$

$$\frac{Dqz \left[(x-2S)^2 - z^2 - \frac{D^2}{4} \right]}{\pi \left[\left((x-2S)^2 + z^2 - \frac{D^2}{4} \right)^2 + D^2 z^2 \right]} \quad (5)$$

综上,根据力的叠加原理可求得围护桩对地层中任意一点处产生的总支护应力 σ_z :

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z3} + \sigma_{z4} + \sigma_{z5} \quad (6)$$

式(6)中, σ_z 的大小反映了围护桩对地层的控制与约束效应, σ_z 越大,说明围护桩对基坑侧壁土体的支护作用也越强。

2 不同桩间距下基坑地层支护应力分析

以基坑通常采用的 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 钻孔围护桩为例,分析了不同 S 对基坑地层支护应力的影响规律。在计算分析过程中,考虑到基坑侧壁土体的埋深影响,桩侧水平土压力 q 分别取 40 kPa 、 80 kPa 及 120 kPa , S 分别取 $1\,200\text{ mm}$ 、 $1\,400\text{ mm}$ 、 $1\,600\text{ mm}$ 、 $1\,800\text{ mm}$ 、 $2\,000\text{ mm}$ 及 $2\,200\text{ mm}$,分析了不同条件下的地层支护应力特征。

图2和图3为典型工况下的地层支护应力分布云图。由图2和图3可见:在钻孔灌注桩支护作用下,地层内部产生了相应的支护应力;在钻孔灌注

桩与土体的接触位置均产生了不同程度的应力集中效应,桩土接触面处土体内部的支护应力最大,随着桩土接触位置距离的增加,地层内部支护应力呈现出不断衰减的趋势。

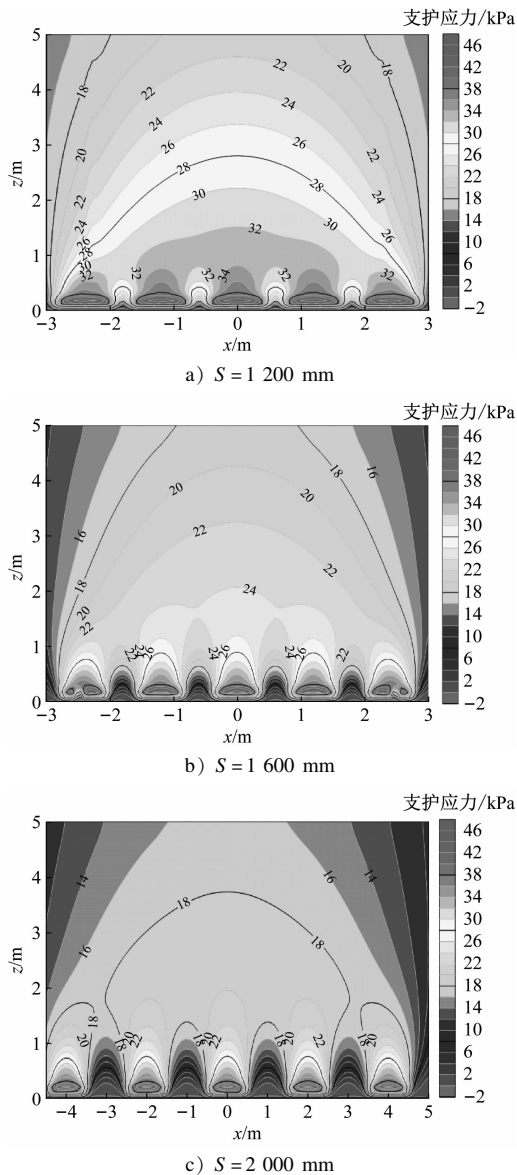


图2 地层支护应力分布云图(q 为 40 kPa)

Fig.2 Cloud map of stress distribution in stratum support (40 kPa)

在相同的 q 作用下,不同 S 下地层内部均可产生一定连续的支护应力,但连续支护应力也存在一定的限制。以图2为例,地层内部小于 32 kPa 的支护应力均是连续的,地层内部超过 32 kPa 的支护应力则不连续;地层内部小于 18 kPa 的支护应力均是连续的,当超过 18 kPa 时则不连续;随着 S 从 $1\,200\text{ mm}$ 增加到 $2\,200\text{ mm}$,土体内部最大连续支护应力从 32 kPa 减小至 16 kPa ,这说明随着 S 的增大,土

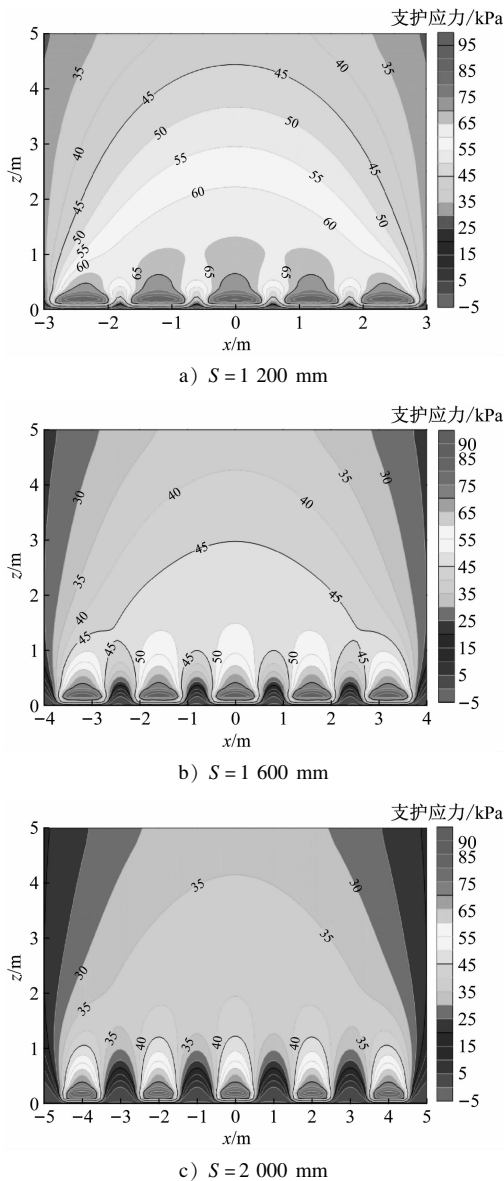
图3 地层支护应力分布云图(q 为 80 kPa)

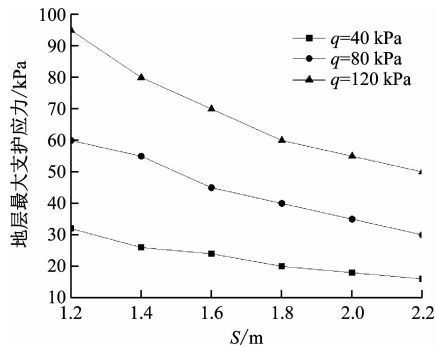
Fig. 3 Cloud map of stress distribution in stratum support (80 kPa)

体内部连续的最大支护应力逐渐减小。

图4为地层最大支护应力- S 关系曲线。由图4可见:地层最大支护应力随着 S 的增大而减小,同时随着 q 的增大而增大。由此可见:地层内部连续的支护应力是确保围护桩后地层土体有效成拱的重要前提,合理的 S 对围护桩后土体成拱也会产生重要影响。

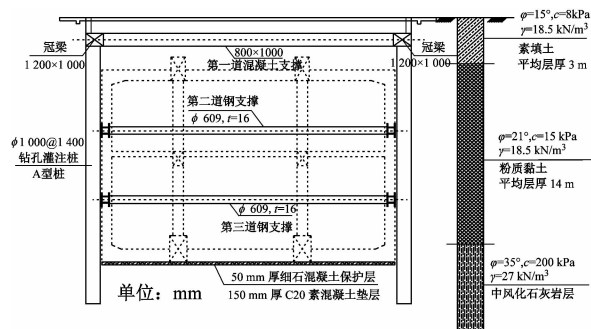
3 工程应用实例

林家庄站为济南轨道交通4号线(以下简称“4号线”)一期工程的第25座车站。该车站为地下二

图4 地层最大支护应力- S 关系曲线Fig. 4 Graph of maximum stratum support stress and S

层岛式车站,位于济南市历下区经十路与规划路的交叉路口,车站主体结构站厅位于经十路北侧,沿经十路方向敷设。车站外包总长约270.88 m,标准段宽18.7 m(内净宽);端头井宽23.2 m(内净宽)。车站中心线处轨面标高为94.9 m,轨面埋深约16.6 m,顶板覆土为3~4 m。

车站主体基坑均采用明挖顺作法施工。标准段基坑深度约为18.53~19.17 m,坑底位于中风化石灰岩层中。基坑周边普遍分布的地层从上往下依次为填土、粉质黏土、石灰岩,属于典型的土岩地层复合基坑。为保证基坑的稳定性,围护结构采用围护桩+内支撑、围护桩+锚索的支护形式。林家庄站基坑标准段围护结构示意图见图5。



注: φ 、 c 、 γ 分别为内摩擦角、黏聚力和重度; t 为钢支撑壁厚。

图5 林家庄站基坑围护结构示意图(标准段)

Fig. 5 Schematic diagram of foundation pit retaining structure in Linjiazhuang Station (standard section)

根据本文提出的围护桩支护力学分析方法,采用林家庄站现场的具体参数进行计算并绘制出相应的地层支护应力云图。选取现场5根围护桩,围护结构为 $\phi 1\,000$ mm 钻孔灌注桩, S 为1.4 m;根据现场地勘报告,基坑坑底上部土体主要由素填土及粉质黏土构成,故选取土体平均重度为 20 kN/m^3 ,土体平均侧压力系数为0.4,基坑开挖深度为18.5

m。选取现场基坑距地面深度分别为 5.5 m、11.0 m、16.5 m 处剖面进行测算,相对应剖面处的土体侧压力分别为 44 kPa、88 kPa、132 kPa。应用本文计算方法,计算得出林家庄站基坑围护桩-地层支护应力云图,如图 6 所示。

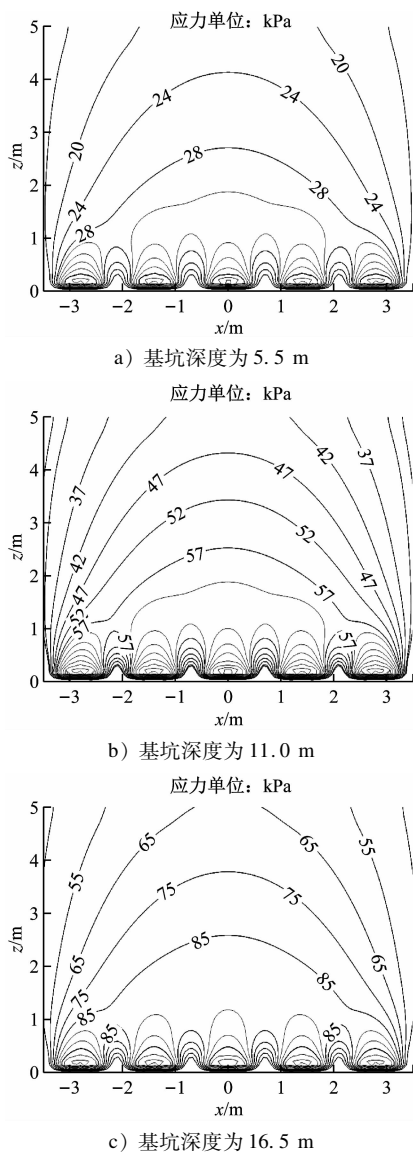


图 6 林家庄站基坑围护桩-地层支护应力云图

Fig. 6 Stress cloud diagram of foundation pit retaining pile and stratum support in Linjiazhuang Station

由图 6 可见:沿着桩身 3 个深度处对应的支护应力云图内,桩后土体内部均有效形成了土拱,且随着深度的增加,相应的土拱内支护应力逐渐增大。现场采用围护桩支护参数施工后,有效保证了基坑开挖与主体结构施作期间的安全与稳定。根据现场监测数据,基坑坡顶最大沉降量为 10.0 mm,坑底隆起量为 9.6 mm,围护桩的最大水平变形量为

8.0 mm,满足基坑设计与监测要求。

林家庄站基坑开挖现场施工图见图 7。



图 7 林家庄站基坑开挖现场施工图

Fig. 7 Construction picture of foundation pit excavation site in Linjiazhuang Station

4 结语

以基坑围护桩为研究对象,提出了围护桩支护下基坑周边地层支护应力的理论计算模型,推导了支护应力的理论计算公式,分析了不同 S 与 q 下的支护应力分布特征。结合林家庄站实际工程进行了试算分析,保证了现场支护参数的有效选取与现场支护设计的安全,可为土岩复合地层基坑围护桩设计提供一定的理论参考。

参考文献

- [1] 任连伟,徐健,孔纲强,等. 冬季工况多次温度循环下微型钢管桩群桩热力响应特性现场试验[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2053.
REN Lianwei, XU Jian, KONG Gangqiang, et al. Field tests on thermal response characteristics of micro steel pile group under multiple temperature cycles in winter conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 2053.
- [2] 高涌涛,许强,赵其华,等. 微型钢管桩桩-土复合抗滑结构耗能特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 621.
GAO Yongtao, XU Qiang, ZHAO Qihua, et al. Study on energy dissipation characteristics of micro steel tube pile-soil composite anti slide structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 621.
- [3] 谭轲,王卫东,邸国恩. TRD 工法型钢水泥土搅拌墙的承载变形性状分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 191.
TAN Ke, WANG Weidong, DI Guoen. Deformation and bearing characteristics of steel cement-soil wall constructed by TRD method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 191.
- [4] 周剑波,杨子跃,徐鹏. 支护桩桩间土拱效应及合理桩间距分析[J]. 工程勘察, 2021, 49(9): 25.

(下转第 134 页)

- 机车电传动, 2005(5): 43.
- LI Kunpeng, ZHANG Zhensheng. Design of ground braking resistor in Guangzhou metro line 4 [J]. Electric Drive For Locomotives, 2005(5): 43.
- [2] 刘雨. 地铁牵引系统电制能量吸收方法的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
- LIU Yu. Study on absorption method of electric-brake energy in Metro traction system [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2021.
- [3] 李鹤群, 曲诗健, 侯朋岐, 等. 基于地面再生制动能量吸收装置的地铁车辆过渡电阻设计[J]. 铁道机车与动车, 2021(2): 1.
- LI Hequn, QU Shijian, HOU Pengqi, et al. Design of subway vehicle transition resistance based on ground regenerative braking energy absorption device [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2021(2): 1.
- [4] 欧宗味. 制动电阻散热特性及其瞬态温度响应仿真模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- OU Zongwei. Research on heat transfer characteristic and simulation model of transient temperature of braking resistor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [5] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [6] 李辰加. 制动电阻强化散热分析[J]. 机车电传动, 1998(2): 43.
- LI Chenjia. Analysis of enhanced heat dissipation by braking resistors [J]. Electric Drive for Locomotive, 1998(2): 43.
- 收稿日期:2023-06-13 修回日期:2023-08-03 出版日期:2024-03-10
Received:2023-06-13 Revised:2023-08-03 Published:2024-03-10
· 作者:霍长龙,高级工程师,15146967@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 129 页)
- ZHOU Jianbo, YANG Ziyue, XU Peng. Analysis of soil arching effect of soldier pile and optimal pile spacing [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021, 49(9): 25.
- [5] 赵晓彦, 吴兵, 李登峰, 等. 考虑桩间水平土拱效应的边坡桩间墙组合结构受力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 811.
- ZHAO Xiaoyan, WU Bing, LI Dengfeng, et al. Load calculation method for retaining wall between piles considering horizontal soil arching effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 811.
- [6] 张玲, 陈金海, 赵明华. 考虑土拱效应的悬臂式抗滑桩最大桩间距确定[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4497.
- ZHANG Ling, CHEN Jinhai, ZHAO Minghua. Maximum cantilever anti-slide piles spacing determination with consideration of soil arching effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4497.
- [7] 李登峰, 赵晓彦, 胡卸文, 等. 抗滑桩截面尺寸对土拱性状的影响[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 484.
- LI Dengfeng, ZHAO Xiaoyan, HU Xiewen, et al. Influence of sectional dimension of stabilizing piles on soil arching characteristics [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 484.
- [8] 弗洛林. 土力学原理: 第一卷[M]. 同济大学土力学及地基基础教研室, 译. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- FLORIN B A. Principles of soil mechanics; Vol. 1 [M]. Department of Soil Mechanics and Foundation, Tongji University, trans. Beijing: China Industry Press, 1965.
- [9] 李同林, 殷绥域. 弹塑性力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.
- LI Tonglin, YIN Suiyu. Elastic-plastic mechanics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006.
- [10] 徐秉业, 王建学. 弹性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- XU Bingye, WANG Jianxue. Elastic mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- 收稿日期:2023-03-25 修回日期:2023-07-03 出版日期:2024-03-10
Received:2023-03-25 Revised:2023-07-03 Published:2024-03-10
· 作者:吴行州,高级工程师,19953124369@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
- ~~~~~

“市域(郊)铁路发展联合研究中心”揭牌

2024 年 1 月 30 日,国家铁路局规划与标准研究院和中铁上海设计院集团有限公司签订了共建“市域(郊)铁路发展联合研究中心”框架协议并举行了揭牌仪式。该联合研究中心将以科技创新为驱动、以人才培养为核心、以解决问题为导向,开展规划设计、建造施工、运营管理等领域内的基础理论研究、应用技术开发、标准制修订、产品研发等工作,共同打造具有行业影响力的综合性研究中心,为行业发展提供前瞻性、系统性、创新性的智库支撑。

(来源:中铁上海设计院集团有限公司)