

成都地区卵石地层深基坑开挖的土压力计算方法

李 姝¹ 闫 胜¹ 张 霄² 杨恒洪²

(1. 四川水利职业技术学院资源环境工程学院, 611231, 成都; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 现有土压力理论计算方法未考虑卵石地层孔隙度大、结构松散等离散性特点, 计算结果与实际土压力有所偏差, 需要研究适用于成都地区卵石地层的土压力计算方法。[方法] 以成都轨道交通 7 号线为依托, 分析卵石地层深基坑土压力与朗肯土压力理论值的差别, 并建立深基坑开挖土压力计算方法。采用离散元数值模拟和数据统计分析, 获取围护结构平动、围护结构绕墙顶转动和围护结构绕墙底转动三种基本变位模式下静止土压力、被动土压力和主动土压力的分布特征。与朗肯土压力理论计算结果进行比较, 得到不同变位模式下三种土压力的修正系数, 并建立深基坑土压力修正计算方法。进一步与现场实测数据比较, 对比验证所提出的土压力计算方法。[结果及结论] 主动土压力和被动土压力分布形式具有强烈的非线性, 可采用双折线进行描述, 交点分别位于埋深 8 m 和 9 m 处。静止土压力修正系数分布在 0.91~0.96 之间, 在使用时不需要修正; 主动土压力修正系数分布在 0.33~0.78 之间, 被动土压力修正系数分布在 0.52~0.91 之间, 在使用时应予以修正。所提出的卵石地层深基坑土压力计算结果与现场实测结果吻合较好, 可为类似轨道交通工程提供参考。

关键词 地铁隧道; 卵石地层; 基坑; 土压力; 离散元
中图分类号 TU432

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.032

Earth Pressure Calculation Method for Deep Foundation Pit Excavation in Chengdu Pebble Stratum Area

LI Shu¹, YAN Sheng¹, ZHANG Xiao², YANG Henghong²

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Resources and Environmental Engineering, 611231, Chengdu, China; 2. Southwest Jiaotong University of Civil Engineering, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The existing theoretical calculation method of earth pressure does not take into account the discrete characteristics of pebble stratum such as large porosity and loose structure, and the calculated results are different from the actual earth pressure. Therefore, it is necessary to study the earth pressure calculation method suitable for pebble stratum in

Chengdu area. [Method] Based on Chengdu Rail Transit Line 7, the differences between the earth pressure in deep foundation pit of pebble stratum and the theoretical Rankine value are analyzed, and an earth pressure calculation method for deep foundation pit excavation is established. Using discrete element numerical simulation and statistical data analysis, the distribution characteristics of static earth pressure, passive earth pressure and active earth pressure under the three basic displacement modes of the enclosure structure translation, rotation around the wall top and rotation around wall bottom are obtained. By comparing with the calculation results from Rankine earth pressure theory, the correction coefficient of the earth pressure under three different displacement modes are obtained, and the calculation method of earth pressure correction for deep foundation pit is established. The proposed earth pressure calculation method is verified by further comparison with the on-site measured data. [Result & Conclusion] The distribution of active earth pressure and passive earth pressure shows strong nonlinearity, which can be described by double fold lines, and the intersection points are located at the buried depth of 8m and 9m respectively. The static earth pressure correction coefficient is distributed between 0.91 and 0.96, not need for correction in use. The active earth pressure correction coefficient is distributed between 0.33 and 0.78, and the passive earth pressure correction coefficient is between 0.52 and 0.91, should be corrected in use. The calculated results of earth pressure in deep foundation pit of pebble stratum are in good agreement with the on-site measured results, providing a reference for similar rail transit projects.

Key words metro tunnel; pebble stratum; foundation pit; earth pressure; discrete element

基坑承受的荷载主要为土压力, 且土压力是支护设计中需首先明确的内容。根据挡土墙的变位方向和大小, 传统设计考虑静止土压力、被动土压力和主动土压力三种极限状态。这些传统理论由于其实用性仍被广泛使用。但理论中的完全弹性、平面滑裂面假定等假设, 会使得土压力计算结果与

实际值有所差异^[1]。

学者们通过理论分析、现场测试和数值模拟等手段对土压力分布模式及计算方法的研究发现,土压力分布具有明显的空间效应^[2],会随着基坑的开挖而发生改变^[3]。此外,基于试验结果或现场测试结果,也得到了土力学计算的经验公式^[4-6]。但目前的研究成果主要针对砂土或黏性土等连续介质土层,对卵石地层土压力计算方法的研究较少。而卵石地层具有颗粒粒度不均一、孔隙度大、结构松散等强烈的离散性特点,这与连续介质土层存在较大区别。

对此,本文依托成都市某卵石地层地铁车站深基坑工程,提出了一种卵石地层基坑的土压力修正计算方法。该方法采用离散元数值模拟研究静止土压力、被动土压力和主动土压力的分布模式,并计算3种土压力的修正系数。

1 土压力分布模式

1.1 工程概况

成都地铁工程所在地层主要为砂卵石地层及泥岩砂岩地层,具有卵石多(体积占比约为70%,含大漂石)、卵石强度高(单轴抗压强度达50~150 MPa)、地下水位高(水位埋深一般2~5 m)的特点。

本次研究以成都地铁7号线(以下简称“7号线”)机场路隧道工程为依托。机场路隧道工程围护结构主要采用旋挖桩+内支撑。7号线工程地质类型主要为砂卵石地层,隧址区卵石土呈青褐色及灰白色,密实程度为稍密至中密,饱和,卵石体积占比约为50%~70%,粒径大小约为60~170 mm。粗圆砾体积占比为10%,粒径为20~60 mm,其余为中砂充填,成分以弱风化砂岩、花岗岩为主,磨圆度较好,分选性较差,厚3~15 m。

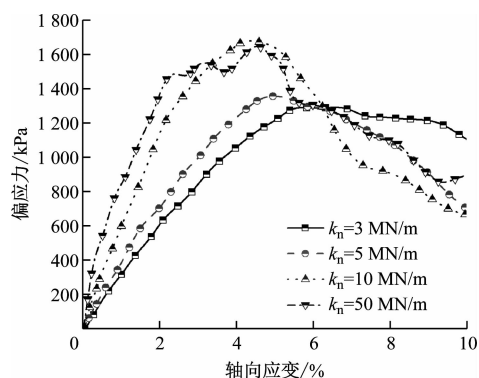
机场路隧道采用明挖顺作法施工。基坑开挖深度约为12.0~24.0 m,直立开挖段的开挖宽度约为13.3~15.5 m,大放坡开挖段的开挖宽度约为43.0~46.5 m。

1.2 模型建立及参数选取

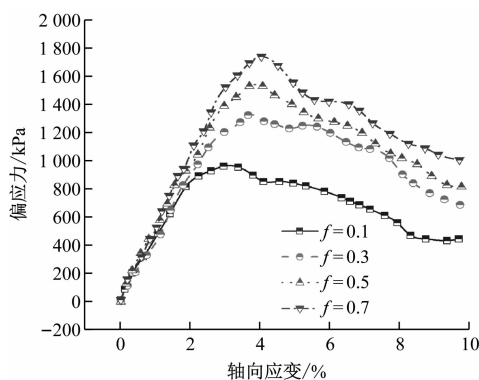
本节采用PFC 2D离散元软件建立离散元数值模型来模拟刚性挡墙的静止、主动、被动3种土压力模式。根据基坑结构特点,取卵石地层厚度的平均值(14 m)进行研究。数值模型宽度为20 m。根据中密卵石地层的实际情况,数值模型中的卵石体积占比取70%。模型由球颗粒和四面墙体组成。

模拟计算前,先在模型范围内随机生成颗粒。为达到预期孔隙率,模型的起始颗粒粒径较小,通过半径放大后达到目标孔隙率(30%)。模型中,卵石密度为2 100 kg/m³,黏聚力为3 kPa,内摩擦角为39°,变形模量为29 MPa,侧压力系数为0.25。

通过三轴压缩试验进行接触刚度 k_n 和摩擦因数 f 的标定。参数标定曲线如图1所示,参数标定后的数值模型细观参数如表1所示。



a) 不同接触刚度 k_n



b) 不同摩擦因数 f

图1 不同刚度及摩擦因数的参数标定曲线

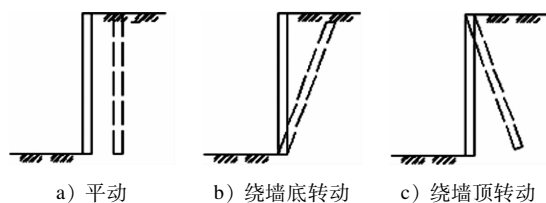
Fig. 1 Parameter calibration curves of different stiffness and friction coefficient

表1 参数标定后的数值模型细观参数

Tab. 1 Mesoscopic parameters of numerical model after parameter calibration

项目	颗粒数量/个	密度/(t/m ³)	法向刚度/(MN/m)	切向刚度/(MN/m)	f
卵石	2 949	2.1	7.4	7.4	5
墙体	3		100.0	100.0	

平动、绕墙顶转动及绕墙底转动是围护墙体的3种基本变位模式。在被动转动情况及主动转动情况下的围护墙体变位模式分别如图2及图3所示,其余模式可由3种基本模式组合得到。



注:虚线墙体为变位后的墙体位置。

图2 被动情况下的围护墙体变位模式

Fig. 2 Enclosure wall displacement modes in passive case

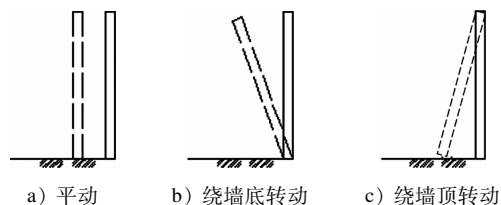
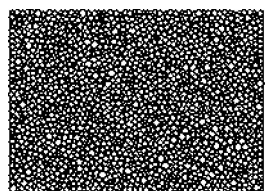


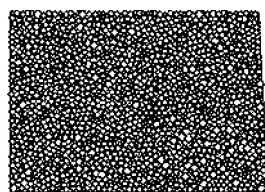
图3 主动情况下的围护墙体变位模式

Fig. 3 Enclosure wall displacement modes in active case

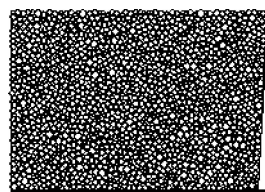
对应于3种变位模式建立3种数值模型,其中被动转动情况下的数值模型如图4所示。通过赋予右侧墙体不同的转动方向来实现不同的变位模式;其他墙体不发生移动以约束颗粒运动,视为边界条件。



a) 平动



b) 绕墙底转动



c) 绕墙顶转动

图4 被动转动情况下的数值模型

Fig. 4 Numerical model in passive rotation

1.3 静止土压力

根据朗肯土压力理论,在不同埋深 h 处静止土

压力 p_0 的理论值为:

$$p_0 = K_0 \gamma h \quad (1)$$

式中:

K_0 ——静止土压力系数;

γ ——土的重度。

土体在自重作用下达平衡状态后,在数值模型中通过应力圆测得不同埋深处的水平应力,即 p_0 量测值。静止土压力的量测值与理论值分布如图5所示。

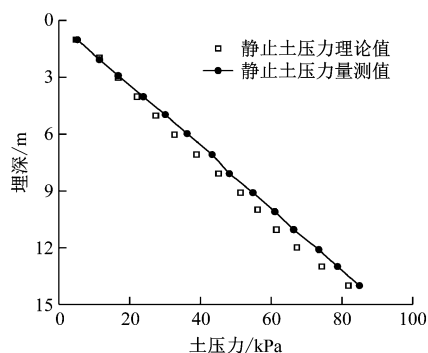


图5 静止土压力量测值与理论值分布

Fig. 5 Distribution of theoretical and measured static earth pressure values

由图5可见,静止土压力的量测值略小于理论值,两者之间差别不大,说明模拟结果能较准确地反映土压力的变化规律。

1.4 主动土压力

对于卵石地层基坑围护墙体,在不同变位模式下的主动土压力墙体移动控制计算参数见表2。

表2 主动土压力墙体移动控制计算参数

Tab. 2 Active earth pressure wall movement control calculation parameters

变位模式	转动中心坐标	移动速率/(m/s)	每一级移动时步	每一级移动后平衡时步
平动		0.000 1	10	3 000
绕墙顶转动	(20,14)	0.000 1	10	3 000
绕墙底转动	(20,0)	0.000 1	10	3 000

根据朗肯土压力理论计算主动土压力的理论值,有:

$$p_a = K_a \gamma h \quad (2)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

式中:

p_a ——主动土压力;

K_a ——主动土压力系数;

φ ——土的内摩擦角。

在主动土压力状态下,土压力分布曲线会随位移量发生变化。以墙体位移 S_{\max} 与墙体高度 H 之比为 0.001^[1] 时的位移作为界限,由数值模型的模拟计算,得到主动土压力 p_a 的模拟值。由理论值和模拟值,绘制 p_a 分布情况并拟合双折线,如图 6 所示。

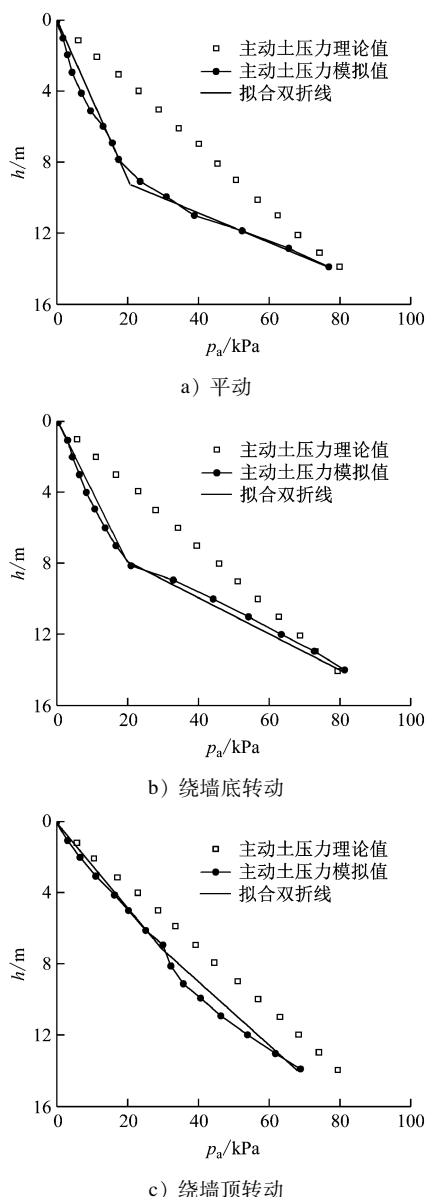


图 6 p_a 分布情况及双折线

Fig. 6 Active earth pressure p_a distribution and double fold lines

由图 6 可知:卵石地层基坑的围护墙体主动土压力具有非线性的分布模式,可采用双折线进行描述;双折线交点在 $h = 8$ m 处;对于墙体平移的变位

模式, p_a 模拟值小于 p_a 理论值,最大差值发生在双折线交点;对于绕墙底转动的变位模式, $h > 12$ m 后, p_a 模拟值与理论值的土压力比较接近,且墙体上部的模拟值要小于理论值;对于绕墙顶转动的变位模式,墙体上部 p_a 的模拟值与理论值比较接近,而墙体下部 p_a 的理论值要略小于模拟值。

1.5 被动土压力

由文献[1]可知,随着围护墙体位移的不断增大,水平土压力也不断发展,当围护墙体位移达到墙高的 2% 时,基坑土体已经达到朗肯被动极限平衡状态。根据朗肯土压力理论,计算被动土压力 p_p 的理论值,有:

$$p_p = K_p \gamma h \quad (4)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5)$$

式中:

K_p ——被动土压力系数。

通过数值模型模拟计算,以墙体位移 S_{\max} 与墙体高度 H 比值为 0.02 时的土体位移作为临界值,得到 p_p 的模拟值。绘制 p_p 分布情况并拟合双折线如图 7 所示。

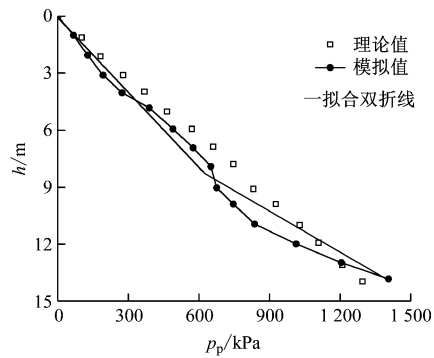
由图 7 可知:卵石地层的基坑 p_p 也具有非线性的分布模式,同样可采用双折线进行描述;双折线交点在 $h = 9$ m 处;对于墙体平移的变位模式, p_p 模拟值接近于 p_p 理论值;当 $h > 13$ m 后, p_p 模拟值略大于 p_p 理论值;对于绕墙顶转动的变位模式, p_p 理论值均大于模拟值。对于绕墙底转动的变位模式, p_p 模拟值曲线的斜率先减小后增大,但始终小于 p_p 理论值。

2 土压力修正系数

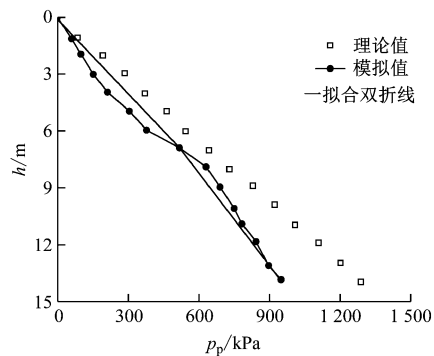
以根据朗肯土压力理论计算得到的各类土压力理论值为基准,可得到不同变位模式下的各类土压力模拟值双折线的误差拟合曲线,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,模拟值双折线的误差基本位于 20% 范围内,说明模拟值双折线能准确反映土压力的分布规律。

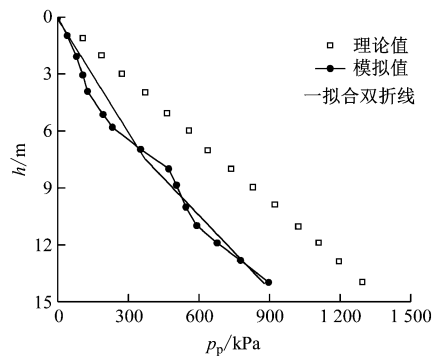
将各类土压力的模拟值与理论值相比较即可得到修正系数。图 9 为 10 m 厚卵石地层的土压力修正系数说明。土压力模拟值为四边形 OABC 的面积 S_{OABC} ,土压力理论值为 $\triangle OAD$ 的面积 S_{OAD} ,故修正系数为 S_{OABC}/S_{OAD} 。根据此方法计算得到土压力修正系数如图 10—图 12 所示。



a) 平动



b) 绕墙底转动



c) 绕墙顶转动

图7 p_p 分布情况及双折线Fig. 7 Passive earth pressure p_p distribution and double fold lines

由图10—图12可知:静止土压力修正系数分布在0.91~0.96之间,差别较小;主动土压力修正系数分布在0.33~0.78之间,被动土压力修正系数分布在0.52~0.91之间,即模拟值与理论值差别较大,在使用时应予以修正。

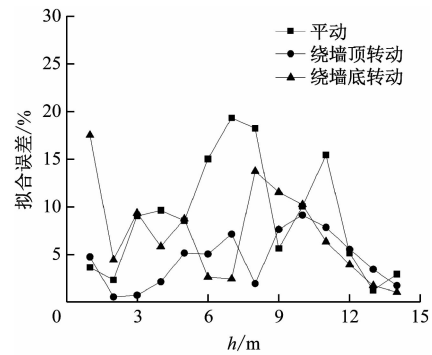
根据研究所得的卵石地层土压力修正系数,卵石地层深基坑土压力修正计算式为:

$$p_{0,x} = \alpha_0 K_0 \gamma h \quad (6)$$

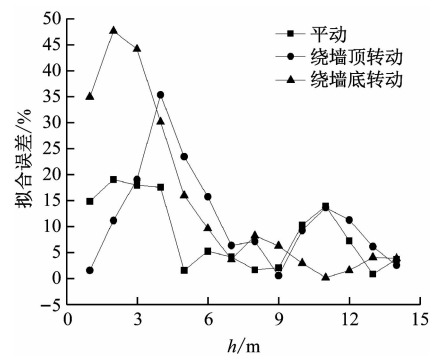
$$p_{a,x} = \alpha_a K_a \gamma h \quad (7)$$

$$p_{p,x} = \alpha_p K_p \gamma h \quad (8)$$

式中:



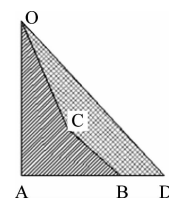
a) 主动土压力



b) 被动土压力

图8 不同变位模式下的各类土压力模拟值双折线的误差拟合曲线

Fig. 8 Error fitting curves of the double fold lines of simulated values for various earth pressures under different displacement modes



注:折线 OCB 为土压力模拟值拟合双折线。

图9 10 m 厚的卵石地层土压力分布

Fig. 9 Earth pressure distribution in 10 m thick cobble stratum

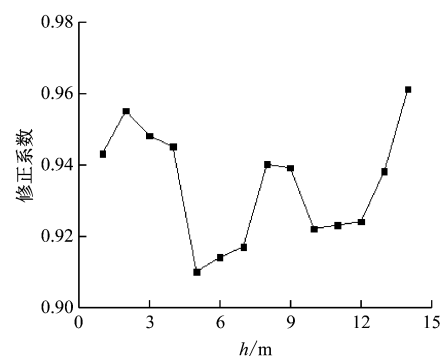


图10 静止土压力修正系数

Fig. 10 Reduction coefficient of static earth pressure

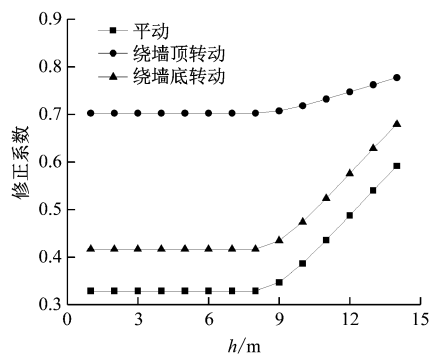


图 11 主动土压力修正系数

Fig. 11 Reduction coefficient of active earth pressure

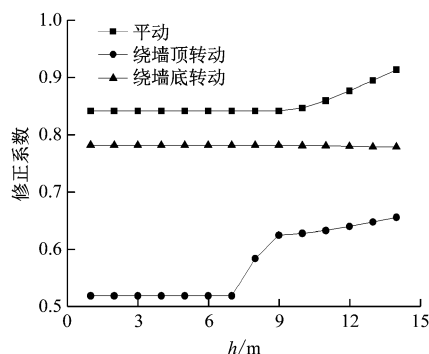


图 12 被动土压力修正系数

Fig. 12 Reduction coefficient of passive earth pressure

$p_{0,x}$ ——修正后的静止土压力;

$p_{a,x}$ ——修正后的主动土压力;

$p_{p,x}$ ——修正后的被动土压力;

α_0 ——静止土压力修正系数,参考图 10 取值,取 0.91 ~ 0.96;

α_a ——主动土压力修正系数,参考图 11 取值,取 0.33 ~ 0.78;

α_p ——被动土压力修正系数,参考图 12 取值,取 0.52 ~ 0.91。

3 工程验证与应用

为验证土压力修正计算方法的可靠性,本研究将基于朗肯土压力理论计算的土压力理论值与现场实测结果相比较。一般实际深基坑围护结构主要承受主动土压力。对成都地铁 3 号线驷马桥站和驷马桥北站基坑主动土压力进行实测,并绘制主动土压力实测值与理论值曲线,如图 13 所示。

由图 13 可知:主动土压力的实测值均小于理论值,对于驷马桥车站,实测值与理论值之比约为 0.33 ~ 0.74;对于驷马桥北车站,实测值与理论值之比约为 0.40 ~ 0.77。可见,两座车站的主动土压力

实测值与理论值之比同土压力修正系数吻合良好,说明所提出的计算方法准确可靠。

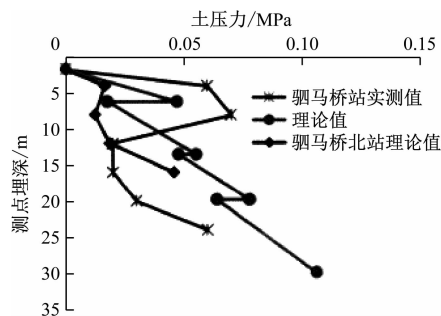


图 13 主动土压力实测值与理论值曲线

Fig. 13 Curves of measured and theoretical active earth pressure values

4 结语

本文采用理论分析、数值模拟、案例验证等手段对卵石地层深基坑土压力计算方法进行研究,并以实际工程为例进行验证,得出以下结论与建议:

1) 卵石地层基坑的主动土压力和被动土压力分布形式具有强烈的非线性,可采用双折线进行描述。主动土压力的双折线交点位于埋深 8 m 处,被动土压力的双折线交点位于埋深 9 m 处。

2) 静止土压力修正系数分布在 0.91 ~ 0.96 之间,差别较小;主动土压力修正系数分布在 0.33 ~ 0.78 之间,被动土压力修正系数分布在 0.52 ~ 0.91 之间,即模拟值与理论值差别较大,在使用时应予以修正。

3) 本文所提出的卵石地层深基坑土压力修正系数与现场实测结果吻合较好,验证了所提出卵石地层深基坑土压力计算方法的可靠性,可为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 魏龙海. 基于颗粒离散元法的卵石层中成都地铁施工力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
WEI Longhai. Study on the mechanical behaviour of subway construction in cobble stratum based on granular discrete element method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [2] 俞建霖, 龚晓南. 软土地基基坑开挖的三维性状分析[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(5): 42.
YU Jianlin, GONG Xiaonan. Three-dimensional behavior analysis of foundation pit excavation in soft soil foundation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1998, 32(5): 42.
- [3] 应宏伟, 谢永利, 潘秋元, 等. 深基坑挡土结构土压力数值研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(4): 28.

(下转第 184 页)

- China based on policies and regulations[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 1.
- [4] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242.
- CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242.
- [5] 李雪山. 基于知识图谱的铁路运输管理工程领域研究热点及趋势分析[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(1): 81.
- LI Xueshan. Research hotspots and trend analysis of railway transportation engineering management based on knowledge graph[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(1): 81.
- [6] 邵春海, 包峰. 全自动运行系统的兴起与未来之路[J]. 城市轨道交通, 2019(2): 18.
- GAO Chunhai, BAO Feng. The rise of fully automatic operation system and the way of the future[J]. China Metros, 2019(2): 18.
- [7] 乔志军, 阮殿波. 超级电容在城市轨道交通车辆中的应用进展[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(2): 83.
- QIAO Zhijun, RUAN Dianbo. Application of supercapacitors in urban rail transit vehicles[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(2): 83.
- [8] 侯秀芳, 梅建萍, 左超. 2020 年中国内地城轨交通线路概况[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(1): 12.
- HOU Xiufang, MEI Jianping, ZUO Chao. General situation of urban rail transit lines in China in 2020[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(1): 12.
- [9] 胡佳琦. 上海市轨道交通车辆智能运维系统研究与应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 5.
- HU Jiaqi. Research and application of intelligent operation and maintenance system for Shanghai rail transit vehicles[J]. Modern Urban Transit, 2019(7): 5.
- [10] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J]. 城市轨道交通, 2020(4): 8.
- China Association of Metros. Outline for the development of smart urban rail transit in China[J]. China Metros, 2020(4): 8.
- [11] 高劲松, 彭博. 关键词频度演化视角下的研究热点挖掘方法研究[J]. 图书与情报, 2020(3): 61.
- GAO Jinsong, PENG Bo. Research hotspot mining method from the perspective of keyword frequency evolution[J]. Library & Information, 2020(3): 61.
- 收稿日期:2021-11-16 修回日期:2022-06-02 出版日期:2024-06-10
Received:2021-11-16 Revised:2022-06-02 Published:2024-06-10
· 通信作者:周嘉行,工程师,zhoujiahang99@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

(上接第 177 页)

- YING Hongwei, XIE Yongli, PAN Qiuyuan, et al. Numerical study on earth pressure of retaining structure in deep foundation pit[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(4): 28.
- [4] 李丽华, 郑志刚, 严寒, 等. 土工格栅加筋土挡墙土压力分析及其计算方法改进[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(6): 1366.
- LI Lihua, ZHENG Zhigang, YAN Han, et al. Analysis of earth pressure on geogrid reinforced retaining wall and improvement of its calculation method[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(6): 1366.
- [5] 杨庆, 钱霄. 成都砂卵石地层桩锚支护侧土压力实测分析[J]. 土工基础, 2011, 25(2): 22.
- YANG Qing, QIAN Xiao. Analysis of actual earth pressure around pile-anchor supporting structure in sandy cobble ground of Chengdu[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, 25(2): 22.
- [6] 张家国, 肖世国, 邹力, 等. 砂卵石地层圆形深基坑支护结构土压力[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 89.
- ZHANG Jianguo, XIAO Shiguo, ZOU Li, et al. Earth pressure on retaining structure of round deep foundation pit in sand-cobble soils[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 89.
- 收稿日期:2023-10-10 修回日期:2024-04-16 出版日期:2024-06-10
Received:2023-10-10 Revised:2024-04-16 Published:2024-06-10
· 通信作者:李姝,副教授,113551899@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

广州市首条地铁环线实现长轨贯通

近日,广州地铁 11 号线赤沙滘站站内最后一节钢轨成功焊接,标志着广州首条地铁环线顺利实现长轨贯通,轨道工程开始进入线路精调和附属设备安装阶段。截至目前,土建工程累计完成 98%,计划年底开通试运营。11 线全长约 44.2 km,全部采用地下敷设方式,全线共设车站 32 座、换乘站 26 座站,其中 16 座车站与既有线路换乘,是名副其实的“换乘之王”。11 号线还将争创全国首条非遗示范线。其中,海珠区琶洲站拟被打造成非遗重点站,展示广东醒狮这一非遗项目。(供稿:广州地铁)