

DOI: 10.11779/CJGE2024S20028

软黏土矩形顶管土压力分布与结构响应分析

龙炼彬^{1,2}, 黄茂松^{1,2}, 时振昊^{*1,2}, 张中杰³, 吕培林³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

摘要: 矩形及类矩形顶管越来越多应用于城市地下空间结构建设, 其结构水土荷载分布特征及结构响应对工程稳定性、安全性尤为重要, 然而相关研究较少。在回顾现有顶管土压力计算方法的基础上, 通过有限元模拟研究了饱和软黏土矩形顶管顶部竖向土压力分布和侧向衬砌变形模式, 提出了包含非均值分布竖向土压力和水平地层抗力的矩形顶管荷载模式, 通过与地层-结构整体有限元模拟对比, 对上述方法进行了验证。主要结论为: ①顶管顶部土压力为非均值分布, 呈现跨中压力小, 两侧压力大的梯形分布模式, 顶部土压力平均值与全覆土土压力相近; ②竖向土压力分布非均值程度随着截面尺寸增加、结构埋深增加、高宽比减少而增加, 高宽比影响最为显著; ③截面高宽比可影响顶管结构侧向变形模式, 扁平顶管侧向向外变形挤压土体, 诱发水平地层抗力; ④竖向土压力非均值分布及水平地层抗力对合理计算软黏土矩形顶管顶部及两腰处弯矩具有重要作用。

关键词: 矩形顶管; 软土; 土压力分布; 结构响应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0006-05

作者简介: 龙炼彬(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程顶管工程等方面的研究工作。E-mail: lblong777@tongji.edu.cn。

Earth pressure distribution and structural response of rectangular pipe jacking in soft clay

LONG Lianbin^{1,2}, HUANG Maosong^{1,2}, SHI Zhenhao^{1,2}, ZHANG Zhongjie³, LÜ Peilin³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design

& Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: The rectangular and quasi-rectangular pipe jackings are increasingly used in the construction of urban underground space structures. Their structural water and soil load distribution characteristics and structural response are particularly important for engineering stability and safety. However, there are few relevant studies. Based on a review of the existing methods for earth pressure of pipe jacking, the vertical earth pressure distribution at the top of rectangular pipe jacking in saturated soft clay and the deformation mode of lateral linings are studied through the finite element simulation, and an improved load model for rectangular pipe jacking that includes non-uniform vertical earth pressure and horizontal soil resistance is proposed. The method is validated by comparing with an overall stratigraphic-structural finite element simulation. The main conclusions are as follows: (1) The earth pressure at the top of pipe is non-uniform, approximately displaying a trapezoidal distribution pattern with smaller pressure at mid-span and higher pressure at both sides. The averaged vertical earth pressure is similar to the full overburden value. (2) The degree of non-uniformity of vertical earth pressure increases with the increase of section size, increase of structural burial depth and decrease of height-to-width ratio, among which the height-to-width ratio has the most significant impact. (3) The height-to-width ratio affects the lateral deformation mode of the pipe jacking structures. The flat pipe jacking deforms laterally outward and squeeze the soil, inducing horizontal soil resistance. (4) The non-uniform distribution of vertical earth pressure and horizontal resistance play an important role in the reasonable calculation of the bending moments at the top and waist of the rectangular pipe jackings in soft clay.

Key words: rectangular pipe jacking; soft clay; earth pressure distribution; structural response

基金项目: 上海市自然科学基金项目(22ZR1447000)

收稿日期: 2024-06-21

*通信作者(E-mail: 1018tjzhenhao@tongji.edu.cn)

表 1 国内主要矩形顶管工程
Table 1 Main rectangular pipe jacking projects in China

编号	工程名称	E/GPa	d/m	B/m	L/m	D_{eq}/m	$\beta=B/L$	H/m
1	上海淞沪路—三门路下立交工程	35	0.70	6.3	9.8	8.9	0.64	12.0
2	莆田火车站涉铁预埋工程	35	0.80	7.7	12.6	11.1	0.61	8.2
3	上海地铁 10 号线伊犁路站	30	0.45	4.3	6.9	6.1	0.62	8.3
4	浙江义乌东华街地下综合管廊	35	0.75	4.3	10.2	7.5	0.42	8.1
5	江苏苏州横山路隧道	35	0.70	5.9	9.8	8.6	0.60	5.0
6	上海轨交 14 号静安寺站	50	0.40	8.7	9.8	10.4	0.89	14.8

注: E 为顶管弹性模量; d 为衬砌厚度; D_{eq} 为矩形顶管截面面积等效圆直径, 按照 $\pi D_{\text{eq}}^2/4 = B \times L$ 计算。

0 引言

伴随着城市地下空间与地下轨道交通的开发利用, 矩形顶管因其空间利用率高等优点逐渐成为地下结构建设中较优的选择。由于地下空间环境复杂, 准确评估矩形顶管结构响应对工程稳定性、安全性尤为重要, 其关键在于明确矩形顶管结构水土荷载分布特性。

针对顶管结构外荷载分布及结构响应, 在现场实测方面, 潘伟强等^[1]分析对比了大断面顶管结构在各个工况下的结构受力性能; 柳献等^[2]监测了顶管隧道纵向力随顶进里程的变化关系。在土压力理论计算方面, 杨仙等^[3]改进了圆形深埋顶管竖向土压力模型; 林越翔等^[4]基于普式压力拱理论分析了类矩形顶管土压力的计算方法。综上所述, 对于矩形顶管水土荷载及结构响应已有较好的研究基础, 但针对软黏土中矩形顶管(特别是涉及大断面)土压力模式和结构受力特征的研究仍较为有限。

本文目标是研究饱和软黏土中矩形顶管水土压力分布特征, 探究荷载模式对顶管结构响应的影响, 并在此基础上提出矩形顶管结构响应分析与计算方法。为此, 首先回顾了顶管土压力计算的主要方法。然后, 利用有限元数值模拟, 分析了饱和软黏土中矩形顶管荷载模式和变形特征。其次, 基于数值模拟结果, 提出了矩形顶管的改进荷载模式。最后, 通过与有限元模拟数据对比, 验证了该方法的合理性。

1 顶管土压力计算现有方法

1.1 竖向土压力

在现有顶管规范^[5-6]中, 针对圆形顶管, 常采用土柱理论和太沙基理论计算作用在其顶部的竖向土压力。

土柱理论将管道正上方土体自重作为竖向土压力, 计算表达式如下:

$$\sigma_{y1} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1)$$

式中: γ_i 为土的重度; h_i 为土体厚度; i 为土层数。
太沙基理论考虑土拱效应, 认为上覆土部分重量通过剪力传递给两侧土体, 计算表达式如下:

$$\sigma_{y2} = \frac{B_t \gamma - 2c}{2K_a \tan \varphi} \left[1 - \exp \left(-\frac{2K_a \tan \varphi H}{B_t} \right) \right] \quad (2)$$

$$B_t = D \left[1 + \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (3)$$

式中: K_a 为主动土压力系数; B_t 为塌落体宽度; D 为管道外径。

1.2 水平土压力

现有规范考虑顶管管节的水平土压力为主动土压力, 采用朗肯土压力理论计算, 并考虑水土分算。

2 有限元验证与结果分析

2.1 模型设置

为研究公式(1)~(3)能否反映大断面矩形顶管结构土压力分布特征, 借助 Plaxis 软件, 建立关于矩形顶管断面的二维轴对称有限元模型^[7]。表 1 总结了部分国内主要矩形顶管工程, 根据表 1 中既有顶管工程结构截面参数信息, 有限元模型中工程顶管的等效直径(D_{eq})为 6, 15 m, 埋深(H)为 5, 15 m, 矩形顶管高度(B)和宽度(L)之比 $\beta = B/L$ 分别为 1.0, 0.8 和 0.6。

土体本构采用 HS 硬化模型, 以上海地区为例, 顶管工程大多位于软黏土地层, 采用上海典型土第④层淤泥质黏土层进行有限元模拟, 土体各参数参照文献[8]选择, 其中顶管衬砌管片采用 Plaxis 软件中的板单元, 材料参数如表 2 所示。

表 2 顶管衬砌结构参数

Table 2 Structured parameters of pipe jacking linings				
$EA/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$EI/(\text{kN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	d/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	ν
2.000E+06	4.167E+03	0.50	8.75	0.15

注: d 为衬砌厚度; γ 为衬砌重度; ν 为衬砌泊松比。

2.2 施工过程模拟

本次采用的有限元数值分析方法是在初始应力分

析的基础上, 根据施工顺序, 分两阶段对顶管施工过程进行建模^[7]: ①激活顶管及边界约束, 开挖顶管内部土体; ②对顶管衬砌进行收缩 (收缩比为 0.5%), 模拟由于土体超挖、结构变形等引起的土压力重分布。

2.3 有限元结果分析

(1) 土压力分布

图 1 给出了作用在软黏土层顶管顶部的竖向土压力分布, 图中 σ_y 为作用在顶管顶部的竖向土压力 (kPa), σ_{y1} 为全覆盖土层竖向有效应力 ($\sigma_{y1} = \gamma' h$, kPa)。

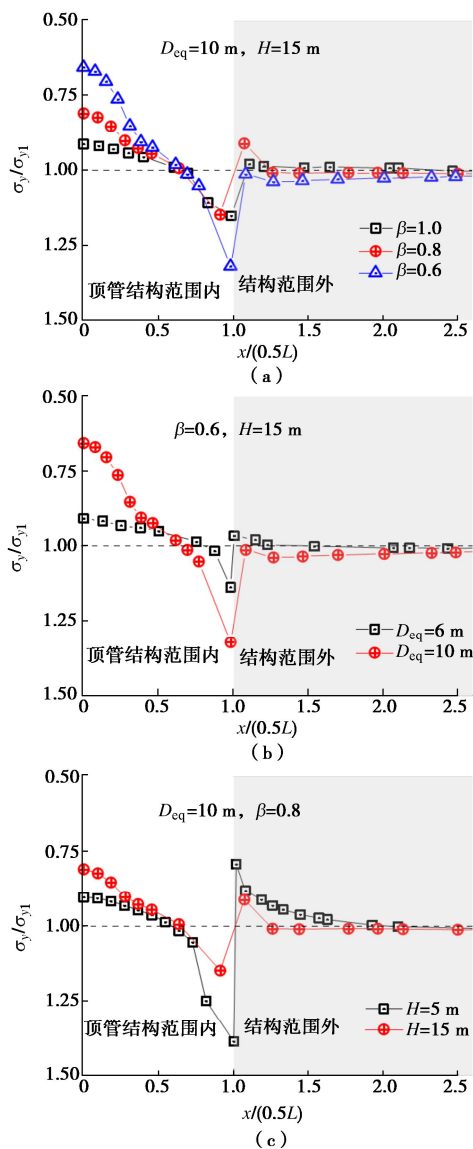


图 1 作用在顶管顶部竖向土压力分布

Fig. 1 Vertical earth pressures acting on top of pipe jacking

由图 1 可知: ①截面中心点处的土压力明显小于全覆盖土自重压力, 并随着距离顶管中心水平距离的增加, 竖向土压力迅速增加, 在顶管结构边缘处, 竖向土压力达到峰值; ②在顶管隧道区外, 竖向土压力发生突变, 迅速减小, 但随着距离顶管中心水平距离的增加, 竖向土压力缓慢增加, 在距离大约为顶管宽度 (L) 时, 竖向土压力值接近全覆盖土层竖向压力;

③顶管隧道区内作用在顶管顶部的竖向土压力平均值近似与原位竖向有效应力相近 (计算平均值与原位压力比值为 0.95), 这与 Sun 等^[9]的研究一致。

当顶管隧道开挖后, 内部土体被挖除, 已完工顶管的重量远小于被挖除土体重量, 顶管隧道会向上移动。同时, 由于周围土体的挤压作用, 顶管衬砌顶部会向内收缩。在两种方式共同作用下, 顶管顶部中心点处的土体向衬砌方向移动, 由静止土压力转化为主动土压力, 而顶管边缘处衬砌向上部土体移动, 土压力转化为被动土压力, 大于其上覆土层土压力。

(2) 结构变形

图 2 汇总了不同高宽比矩形顶管侧向衬砌的变形模式。 $\beta = 1.0$ 时顶管衬砌向内收缩, $\beta = 0.8$ 时衬砌基本不变形, 而 $\beta = 0.6$ 时衬砌明显向外突出变形, 挤压周围土体, 使得侧向土体向外位移, 这与图 1 (a), (b) 反映的对于 $\beta = 0.6$ 的矩形顶管, 在顶管隧道区外部分区域竖向土压力大于全覆盖土压力的现象相符。

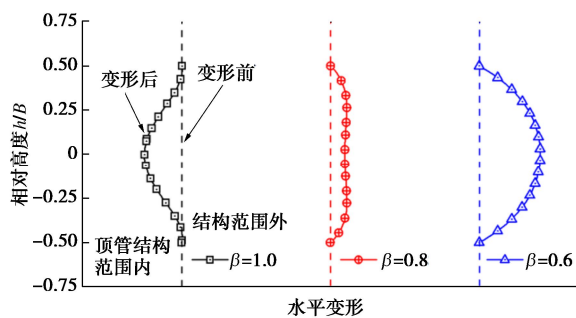


图 2 不同高宽比 (β) 顶管的侧向变形模式图

Fig. 2 Lateral deformation patterns of pipe jacking with different aspect ratios (β)

3 矩形顶管土压力计算方法改进

从上述结果可知, 矩形顶管顶部土压力分布呈现中心处小边缘处大的非均值模式, 且对于扁平性顶管, 其侧向变形明显外凸。本节将对竖向土压力和地层水平抗力分布进行修正, 将顶部竖向土压力调整为跨中小两端大的梯形分布模式, 并在管片两侧借助弹簧模拟地层水平抗力, 图 3 为改进后的矩形顶管荷载模式分布简图。

3.1 竖向土压力

基于图 1 中数值分析结果, 将顶部竖向土压力简化为梯形分布:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{y1}} = (1 - \alpha) \frac{x}{x_0} + \alpha \quad (4)$$

式中: x 为距离顶管中心的水平距离; x_0 为土压力等于全覆盖土压力 (即 $\sigma_y = \sigma_{y1}$) 对应的 x 值, 图 1 数值模拟结果表明在距离顶管中心约 70% 半宽处其竖向土

压力与全覆盖土压力接近, 为此 $x_0 = 0.35L$ (L 为顶管顶部宽度); α 为顶管顶部中心处的土压力与全覆盖土压力的比值。

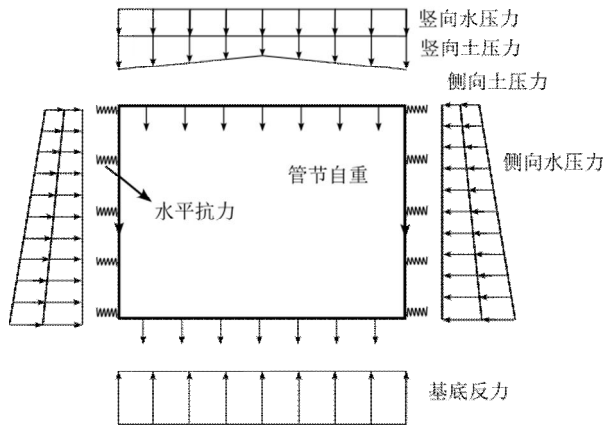


图3 顶管荷载计算简图

Fig. 3 Simplified diagram for calculating pipe jacking load

注意到图 1 中随着截面尺寸增加、顶管埋深增大和截面高宽比 β 减小, 顶管顶部竖向土压力非均值程度增加, 其中高宽比影响显著。基于数值模拟结果, 建立参数 α 与上述因素关系, 得到以下表达式:

$$\alpha = 1 - \frac{HD_{eq}}{k\beta^n} \quad (5)$$

式中: k 为模型参数, 与顶管衬砌弹性模量和厚度有关, 依据有限元分析结果, 建议取值 1500; n 为截面宽高比影响因子, 依据量纲分析, 取值 2.5。

图 4 为土压力计算改进方法与有限元模拟值的对比。从图 4 可知, 该修正公式可以较好地反映顶管顶部竖向土压力非均值分布特征。

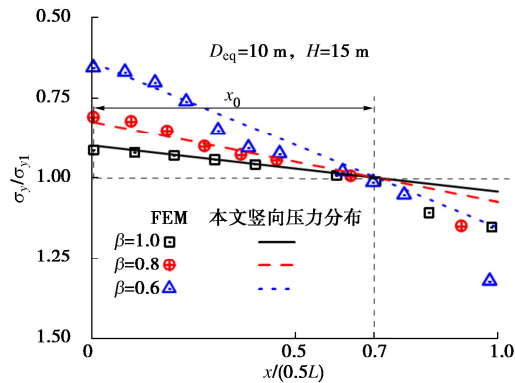


图4 本文竖向土压力计算公式与有限元结果对比

Fig. 4 Comparison of vertical earth pressure computed by proposed equation and finite element simulation

3.2 侧向水平抗力

考虑到顶管侧向变形将挤压周围土体, 诱发地层产生水平地层抗力, 将水平荷载修正为主动土压力与地层抗力的结合, 水平地层抗力 (通过图 3 中土弹簧考虑) 按照下式计算:

$$F = k_s \delta \quad (6)$$

式中: k_s 为土体侧向基床反力系数, 按照文献[10]测试选取; δ 为管片衬砌水平位移值。

3.3 土压力计算改进方法验证

为了验证上述修正荷载模式能否准确反映结构内力, 采用荷载结构法 (Load-structure method, LSM) 水土分算法计算修正荷载模式下的矩形顶管结构弯矩, 对比有限元模拟结果, 对上述修正荷载模式进行验证。

结合表 1 信息, 选取 $\beta = 0.6$ 的大断面矩形顶管进行分析, 图 5 整理了基于土柱理论的现有规范方法[5-6]与本文修正荷载模式下矩形顶管顶部和腰部区域结构弯矩响应。由图 5 可以发现, 各荷载方式计算结果趋势一致, 均能体现矩形顶管结构弯矩分布特征, 但现有规范方法偏向保守, 对结构弯矩进行高估, 而本文修正方法给出的结果与有限元结果更为接近。

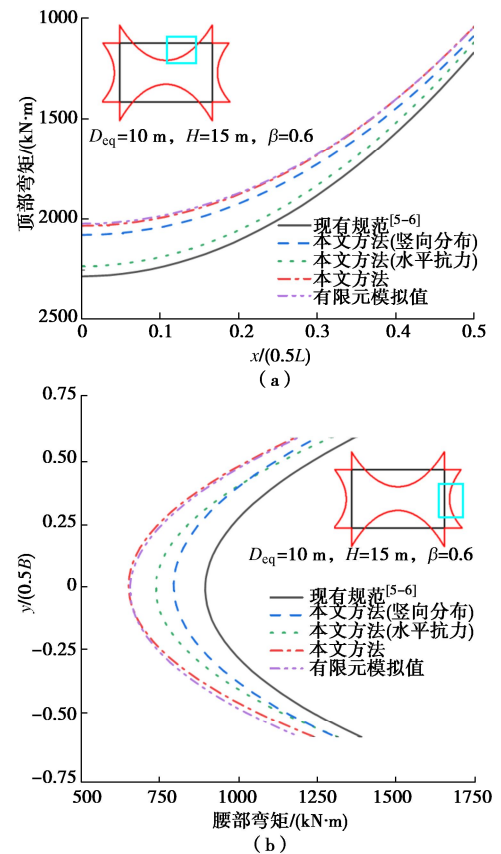


图5 矩形顶管顶部和腰部区域弯矩对比

Fig. 5 Comparison of bending moments at top and waist of rectangular jacking pipe

(1) 考虑顶部竖向土压力的非均值分布可有效降低矩形顶管顶部弯矩, 与有限元结果相比, 最大弯矩误差可由 12.8% 降低为 2.7%, 而水平抗力对顶管顶部弯矩分布影响程度有限。

(2) 而在矩形顶管两侧腰部区域, 考虑由于衬砌变形诱发地层产生的水平抗力, 最大弯矩误差可由 37.5% 下降为 13.2% (仅修正竖向土压力分布对应误差

为 22.4%), 进一步修正竖向土压力分布后, 相对误差减小为不足 1%。

由上述对比可以发现, 考虑竖向土压力非均值分布及水平地层抗力对矩形顶管结构响应具有重要作用, 其中竖向土压力非均值分布对顶管顶部和腰部区域结构响应均能产生显著影响, 而水平地层抗力主要影响顶管腰部区域的弯矩分布。

4 结 论

本文在回顾现有顶管土压力计算方法的基础上, 利用有限元模拟研究了饱和软黏土矩形顶管顶部竖向土压力分布和侧向衬砌变形模式, 提出了包含非均值竖向土压力和水平抗力的矩形顶管的改进荷载模式, 并对上述方法进行了验证, 得到以下 4 点结论。

(1) 顶部土压力分布呈现为跨中小两端大的梯形分布, 顶部压力平均值与全覆土自重压力相近。

(2) 顶部土压力分布非均值程度随着截面尺寸增加、结构埋深增加、高宽比减少而增加, 其中高宽比影响最为显著。

(3) 截面高宽比会影响矩形顶管的侧向变形模式, 扁平顶管侧向衬砌会向外突出对两侧土体产生挤压, 诱发土体产生水平地层抗力。

(4) 竖向土压力非均值分布及水平抗力对合理计算软黏土矩形顶管顶部和两侧腰部区域结构响应具有重要作用。

需要特别指出的是, 本文计算采用水土分算法, 若基于水土合算法进行结构受力分析, 考虑顶部压力非均匀分布对结构响应的影响可更为显著, 将在后续研究中继续开展。

参考文献:

- [1] 潘伟强, 焦伯昌, 柳 献. 大断面类矩形钢顶管结构受力性能现场试验研究: 以上海轨道交通 14 号线静安寺站顶管车站工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 975-983. (PAN Weiqiang, JIAO Bochang, LIU Xian. Mechanical behaviors of quasi-rectangular steel pipe jacking structure with large cross-section: a case study of Jing' an temple pipe jacking station on Shanghai metro line 14[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(6): 975-983. (in Chinese))
- [2] 柳 献, 焦伯昌, 潘伟强, 等. 大断面钢结构顶管纵向力时变规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1810-1816. (LIU Xian, JIAO Bochang, PAN Weiqiang, et al. Temporal variation laws of longitudinal stress of pipe jacking with largesection steel structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical

Engineering, 2022, 44(10): 1810-1816. (in Chinese))

- [3] 杨 仙, 张可能, 黎永索, 等. 深埋顶管顶力理论计算与实测分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 757-761. (YANG Xian, ZHANG Keneng, LI Yongsuo, et al. Theoretical and experimental analyses of jacking force during deep-buried pipe jacking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 757-761. (in Chinese))
- [4] 林越翔, 彭立敏, 吴桂航, 等. 仿矩形顶管管壁摩阻力理论公式的探讨[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 180-185. (LIN Yuexiang, PENG Limin, WU Guihang, et al. Discussion of a theoretical formula for the friction resistance of a pipe wall in quasi-rectangular pipe jacking[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(4): 180-185. (in Chinese))
- [5] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/TJ 08-2268-2019 J 14552-2019 顶管工程设计标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2019. (Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. DG/TJ 08-2268-2019 J 14552-2019 Construction design code for pipe jacking[S]. Shanghai, Tongji University Press, 2019. (in Chinese))
- [6] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/J 08-11-2018 J 11595-2018 地基基础设计标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2019. (Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. DG/J 08-11-2018 J 11595-2018 Foundation design code[S]. Shanghai, Tongji University Press, 2019. (in Chinese))
- [7] CHEN K H, PENG F L. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 75: 43-66.
- [8] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290. (WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290. (in Chinese))
- [9] SUN W H. Research on the calculation method for vertical earth pressure of shield tunnel in soil layer[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(10): 69-73.
- [10] 林华国, 唐世栋. 上海地区软土层侧向基床反力系数规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 495-499. (LIN Huaguo, TANG Shidong. Study on the horizontal coefficient of subgrade reaction for soft soil layers in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 495-499. (in Chinese))

(编校: 孙振远)