

考虑松动区高度影响的城市深埋隧道 松动土压力研究^{*}

董俊¹ 邱翼² 申玉生²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430074, 武汉;

2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 传统的太沙基松动土压力理论是基于浅埋地层这一基本假定建立的,其对于城市深埋地层不具备适用性。在深埋土质隧道土拱效应完全发挥情况下,考虑主应力轴旋转修正无黏性土侧压力系数计算方法;基于有限差分数值平台开展不同埋深、不同内摩擦角下的有限元模拟确定深埋黏性土层的破坏模式。给出考虑主应力轴旋转和内摩擦角对松动区高度影响的深埋无黏性土、黏性土地层的松动土压力计算公式,以实现对城市深埋土质隧道上覆土压力的准确计算。修正公式计算结果与文献、数值模拟结果对比分析结果表明:在深埋情况下,无黏性土层松动土压力修正公式计算结果与文献结果吻合良好;土体强度参数会对黏性土松动区高度造成影响,即随着内摩擦角的增大,松动区高度不断减小;黏性土层松动土压力修正公式计算结果与数值模拟结果吻合良好。

关键词 地下工程;土拱效应;深埋隧道;松动土压力;有限差分数值模拟

中图分类号 U451+.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.002

Urban Deep-buried Tunnel Loosening Earth Pressure Considering the Loosening Zone Height Influence

DONG Jun, QIU Yi, SHEN Yusheng

Abstract The conventional theory of Terzaghi loosening earth pressure is developed on the basic hypothesis of shallow-buried tunnel, which is not applicable to urban deep-buried tunnel. Under the condition that the soil arching of deep-buried soil tunnel is fully developed, the calculation method for lateral pressure coefficient of cohesionless soil is modified by considering the rotation of principal stress axis. Based on finite difference numerical platform, the failure modes of deep-buried cohesive soil of different buried depths and internal friction angles are determined by finite element simulation. The calculation

formula for loosening earth pressure of deep-buried cohesionless soil and cohesive soil layer considering the influence of principal stress axis rotation and internal friction angle on loosening zone height is given, in order to achieve accurate calculation of the overburden earth pressure on urban deep-buried tunnel. The calculation results of the modified formula are compared with literature and numerical simulation results, and the results show that in the case of deep-buried tunnel, the calculation results of the modified formula for cohesionless soil are in accordance with literature; the soil strength coefficients will affect the loosening zone height of cohesive soil, meaning that, the loosening zone height decreases with the increase of internal friction angle; the calculation results of the modified formula for cohesive soil are in accordance with the numerical simulation results.

Key words underground engineering; soil arching effect; deep-buried tunnel; loosening earth pressure; finite difference numerical simulation

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430074, Wuhan, China

近年来,伴随着我国中心城市地下交通和服务网络的不断完善,新建隧道埋深在不断增加,合理地确定支护方案也越发重要。在深埋隧道开挖过程中,开挖面上覆土压力是影响支护结构设计的重要因素^[1],也是隧道工程施工安全的研究热点。由于土拱效应的存在,隧道上部土压力远小于全覆土压力^[2],所以对隧道围岩压力的研究不能忽略土拱效应。

文献[3]通过活动门试验,推导出采用极限平衡理论的松动土压力公式,并获得了广泛认可。但由于传统太沙基公式中存在未考虑主应力轴旋转

^{*} 国家重点研发计划项目(2019YFC0605104)

的影响、侧压力系数的取值为经验值等缺陷,众多学者针对太沙基松动土压力理论进行了大量的研究,以使该公式具备广泛适用性^[46]。这些研究对主应力轴旋转、松动区宽度等进行了充分的讨论和分析,是太沙基松动土压力理论的有效补充,但其研究对象多针对浅埋隧道。随着中心城市隧道埋深的不断增加,部分土质隧道已经进入了深埋阶段^[7]。

多位学者针对深埋隧道松动土压力进行了研究^[8-11]。这些研究对深埋隧道破坏模式、应力传递方式等进行了详尽的分析讨论,但在松动区高度的选取上多直接假定为一固定值,未考虑土体强度参数对松动区高度的影响;且在破坏模式的假定上,不同埋深均采用同一种破坏模式,未考虑覆径比对破坏模式的影响。

鉴于上述松动土压力计算方法的不足,本文在文献[9-10]研究的基础上,考虑内摩擦角对松动区高度的影响以及覆径比对深埋地层破坏模式的影响,对黏性土太沙基松动土压力计算公式进行了参数修正;通过考虑主应力轴旋转,修正了无黏性土太沙基松动土压力公式中侧压力系数 K 的计算方法,并与其他研究者的计算方法进行对比,分析了内摩擦角对侧压力系数 K 的影响;最后将修正公式计算结果与有限差分数值模拟结果及相关文献中的结果进行了对比,验证了修正公式的合理性。本文结论可对深埋土质隧道松动土压力的计算提供参考。

1 松动土压力修正解

1.1 深埋隧道无黏性土层松动土压力计算方法

对无黏性土松动土压力的计算,本文的基本假定为:①滑裂面土体处于极限平衡状态;②滑裂面处水平应力 $\sigma_h >$ 松动土压力 σ_v 。当隧道埋深比约为2时,隧道上部已经形成了较稳定的土拱效应,松动土压力趋于稳定^[4]。因此,对深埋无黏性土的松动土压力计算,标定其稳定的松动土压力值即可。基于太沙基松动土压力公式,修正深埋条件下无黏性土松动土压力计算公式。

根据图1无黏性土莫尔圆几何关系可得式(1):

$$\sigma_h = \sigma_3 \cos^2 \theta + \sigma_1 \sin^2 \theta \quad (1)$$

式中:

θ ——大主应力与水平面夹角;

σ_1 ——最大主应力;

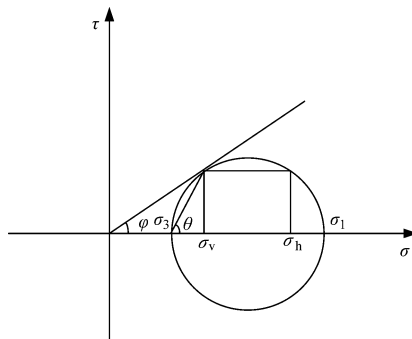
σ_3 ——最小主应力。

大主应力与水平面夹角 θ 的计算式为:

$$\theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

式中:

φ ——土体内摩擦角。



注: σ ——应力; τ ——剪应力。

图1 滑裂面处土体莫尔圆(无黏性土)

Fig. 1 Mohr circle of soil mass on slip fracture plane (cohesionless soil)

对于侧压力系数 K_h ,假设大主应力轨迹线为圆弧线,通过积分求得土层的平均竖向应力^[12],最终得到无黏性土侧压力系数 K_h ,计算公式为:

$$K_h = \frac{\cos^2 \theta + K_p \sin^2 \theta}{1 + \frac{1}{3} (K_p - 1) \sin^2 \theta} \quad (3)$$

式中:

K_p ——被动土压力系数。

将 K_h 代入太沙基原公式,得到修正公式为:

$$\sigma_v = \frac{\gamma B_1}{K_h \tan \varphi} \left(1 - e^{\frac{-K_h D_3 \tan \varphi}{B_1}} \right) + q e^{\frac{-K_h D_3 \tan \varphi}{B_1}} \quad (4)$$

式中:

γ ——土体重度;

B_1 ——松动区半宽;

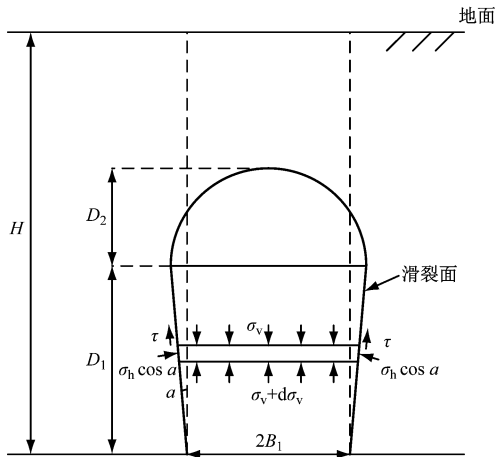
q ——均布荷载;

D_3 ——松动区高度。

1.2 深埋隧道黏性土层松动土压力计算方法

对于黏性土的松动土压力计算, Terzaghi 松动土压力分析模型如图2所示。本文基本假定为:①滑裂面土体处于极限平衡状态;②松动区上方存在半圆形潜在滑动区域;③松动区内土体应力均匀分布。考虑此基本假定和图2所示松动土压力分析模型,在深埋情况下隧道上方存在倒梯形土拱和半圆

形土拱,两种土拱共同发挥作用完成应力重分布。土体压力先作用于半圆形土拱上,经半圆形土拱应力重分布后,作用在倒梯形土拱上的均布荷载 q_2 由半圆形土拱自重 G 及半圆形土拱上部土体对下方土体产生的竖向应力 σ_{vr} 产生。



注: a ——滑动面与竖直方向的夹角; D_1 ——倒梯形土拱高度; D_2 ——半圆形土拱高度; H ——隧道埋深。

图2 松动土压力分析模型

Fig. 2 Loosening earth pressure analysis model

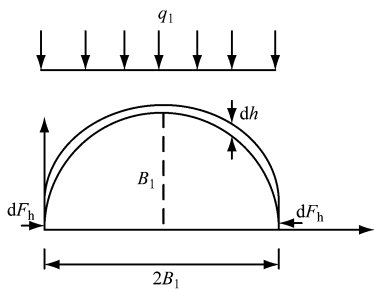
在半圆形土拱上方取一个厚度为 dh (h 为半圆形土拱厚度) 的土拱微元体,上方土体作用在微元体上的土压力等效为均布荷载 q_1 ,计算公式为:

$$q_1 = \left(\gamma - \frac{\sigma_{vr}}{H - D_1 - D_2} \right) dh \quad (5)$$

式中:

σ_{vr} ——半圆形土拱下方土体所受竖向应力。

半圆形土拱的荷载传递形式类似于结构拱^[10],其荷载传递方式如图3所示。



注: F_h ——水平推力。

图3 半圆形土拱荷载传递示意图

Fig. 3 Diagram of semi-circular soil arch load transfer

参考结构拱的计算方法,半圆形土拱微元体在 q_1 的作用下,土拱拱脚的水平应力如下:

$$\sigma_h = \frac{dF_h}{dh} = \frac{B_1}{2} \left(\gamma - \frac{\sigma_{vr}}{H - D_1 - D_2} \right) \quad (6)$$

在计算黏性土的侧压力系数 K 时可采用文献[13]中的计算方法,最终得 σ_{vr} 表达式如下:

$$\sigma_{vr} = \frac{\gamma B_1}{2K + \frac{B_1}{H - D_1 - D_2}} \quad (7)$$

半圆形土拱自重以及上方土体产生的竖向应力共同以均布荷载 q_2 的形式为作用在倒梯形土拱上,均布荷载 q_2 计算公式为:

$$q_2 = \frac{\gamma \pi B_1}{4} + \sigma_{vr} \quad (8)$$

取倒梯形土拱中厚度为 dz (z 为倒梯形土拱厚度) 的微元体,根据极限平衡原理,建立平衡方程后得到隧道拱顶的松动土压力 σ_v 计算公式:

$$\sigma_v = \left[\frac{\gamma B_1}{K \cos a \tan \varphi - \tan a} - \frac{c}{K \cos a \tan \varphi} \right] + \frac{B_1''}{(B_1 + D_1 \tan a)^u} \left[q_2 - \frac{\gamma (B_1 + D_1 \tan a)}{K \cos a \tan \varphi - \tan a} + \frac{c}{K \cos a \tan \varphi} \right] \quad (9)$$

式中:

c ——土体黏聚力。

系数 u 可由式(10)求得:

$$u = \frac{K \cos a \tan \varphi}{\tan a} \quad (10)$$

将式(8)、式(10)代入式(9),即得到修正公式。

2 修正公式参数分析

2.1 无黏性土公式验证

根据文献[14]的模型试验表明,当砂土受到充分扰动时,侧压力系数 $K_h > 1$,这与本文假定相符。将本文的侧压力系数计算方法与其他研究者对比,对比结果如图4所示。

通过与其他研究者相对比,本文侧压力系数与文献[5]的趋势一致,表明随着内摩擦角增大,侧压力系数增大,土拱效应增强,松动土压力减小。而文献[12]和文献[13]由于假定滑裂面处 $\sigma_h < \sigma_v$,故其侧压力系数随内摩擦角增大而减小,计算所得的松动土压力偏大。

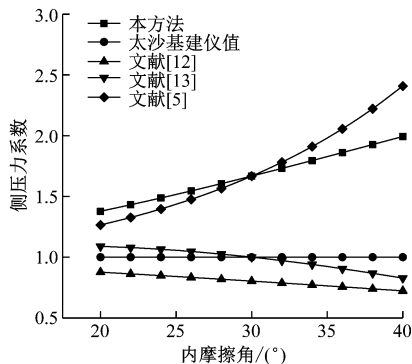


图4 侧压力系数对比及内摩擦角对侧压力系数的影响
Fig. 4 Comparison of lateral pressure coefficients and the influence of internal friction angle on lateral pressure coefficients

2.2 黏性土公式验证

当隧道埋深较大时,土拱效应不能向地表无限延伸,在松动区 D_1 上部时,其土压力与全覆土压力 P 基本一致,靠近松动区时,由于土拱效应,其土压力曲线会出现拐点并迅速减小^[15]。而对于土拱效应存在的区域,文献[3]仅给出了经验值,但土体参数、施工条件等都会影响到松动区的高度。

通过对图5松动区土体摩尔应力圆进行分析,当内摩擦角增大时,土体达到极限平衡状态所需的应力会增大,则达到极限平衡状态的土体埋深会增大。这表明当内摩擦角增大时,松动区高度 D_3 会变小。

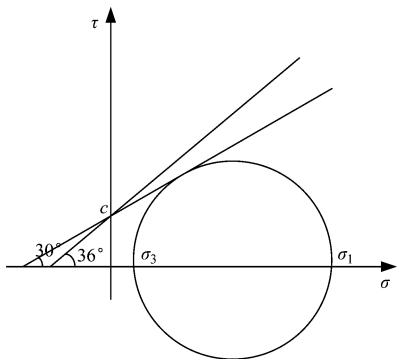


图5 不同内摩擦角下的摩尔应力圆
Fig. 5 Mohr's stress circle of different internal friction angles

据此,假定松动区高度 D_3 满足式(11):

$$D_3 = \frac{1.5 d}{\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)} \tag{11}$$

式中:

d ——隧道直径。

并采用此假定与其他研究者的研究结果进行

对比,由表1可知,由本方法计算的松动区高度具有一定的合理性。

表1 松动区高度结果对比					
Tab.1 Comparison of loosening zone heights					
研究者	研究方法	覆径比	D_3/m	内摩擦角/(°)	D_3 (本方法)/m
文献[16]	离心机试验	2.0	0.67 d	38.0	0.730 d
文献[17]	1 g 模型试验	2.0	0.80 d	31.5	0.840 d
文献[11]	离散元模拟	4.0	0.75 d	32.5	0.820 d
文献[18]	离心机试验	1.5	0.86 d	34.0	0.790 d

对于太沙基松动土压力理论中的竖向土条假定,随着埋深的增大,松动区逐渐具有一定的张开角,这一点在黏性土中更为明显^[6],结合其他研究者的研究结果以及数值模拟,假定 a 与覆径比(H/d)的关系满足:

$$a = \frac{H}{2D} \tag{12}$$

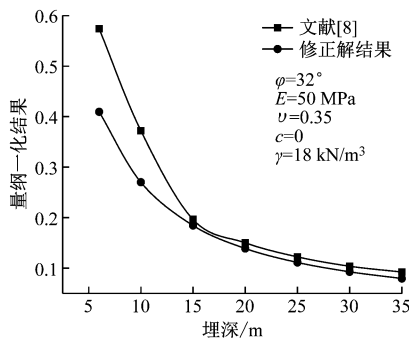
松动区宽度可根据文献[4]结论选取。

3 修正解与数值模拟结果比较

为验证本文松动土压力修正解的正确性,将修正解计算结果与数值模拟以及其他研究者的研究结果进行对比。

3.1 无黏性土结果对比

将本文修正解计算结果与文献[8]活动门数值模拟结果进行对比,结果如图6所示。



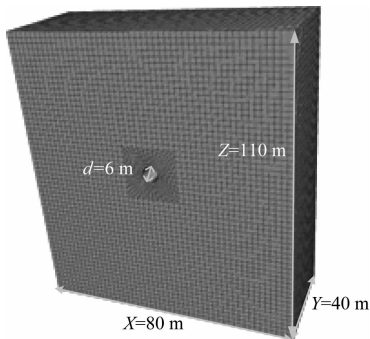
注: E 为弹性模量; ν 为泊松比。
图6 修正公式结果与文献[8]数值模拟结果对比
Fig. 6 Comparison between modified formula results and numerical simulation results from reference No. 8

结果表明,以埋深比为2.5作为深浅埋界限^[19],在浅埋阶段,修正解结果相比于文献[8]数值模拟结果偏小,这是由于埋深较浅时,土拱发挥不完全^[12],而修正公式是基于土拱完全发挥的假设

下,因此修正解的结果在浅埋阶段偏小。当埋深比 >2.5 时,土拱效应充分发挥,修正解结果与文献 [8] 吻合良好,验证了修正解的正确性。

3.2 黏性土结果对比

采用 Flac^{3D} 6.0 有限差分软件,对不同埋深、不同内摩擦角的黏性土隧道开挖进行数值模拟。基于该有限差分软件的隧道数值模型如图 7 所示,数值模拟工况见表 2。



注:X——模型宽度;Y——模型厚度;Z——模型高度。

图 7 基于有限差分软件的隧道数值模型

Fig. 7 Tunnel numerical model based on finite difference software

表 2 隧道数值模拟工况

Tab. 2 Tunnel numerical simulation working conditions					
工况	埋深/m	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa
1	10	18	136	33	10
2	20	18	136	33	10
3	30	18	136	30~40	10
4	40	18	136	30~40	10
5	50	18	136	33	10
6	60	18	136	33	10

首先对深埋情况下,不同内摩擦角下地面至隧道拱顶的土压力轮廓曲线进行分析,根据文献 [15] 中太沙基松动土压力轮廓图,将地面至拱顶土压力曲线出现拐点处视为松动区最高点。埋深分别选取 30 m 及 40 m 时,地面至拱顶的土压力数值模拟结果分别如图 8、图 9 所示。结果表明,在不同埋深下,内摩擦角增大时,土压力与埋深曲线的拐点明显右移,即松动区高度随着内摩擦角的增大而不断减小,与公式计算所得的趋势相同,符合修正公式参数分析结果。

然后对隧道拱顶松动土压力与埋深的关系曲线进行研究,参数选取见表 3。

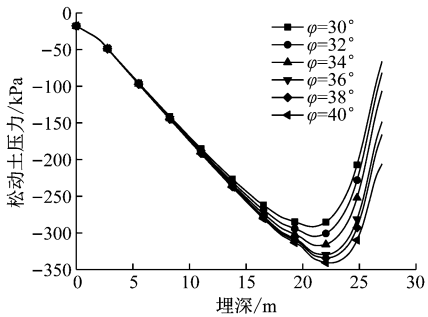


图 8 埋深 30 m 时地面至拱顶的土压力曲线

Fig. 8 Curves of earth pressure from ground to vault at buried depth of 30 m

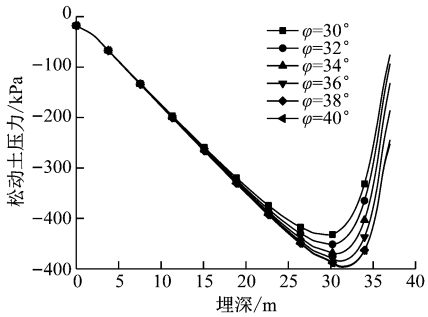


图 9 埋深 40 m 时地面至拱顶的土压力曲线

Fig. 9 Curves of earth pressure from ground to vault at buried depth of 40 m

表 3 数值模拟参数

Tab. 3 Numerical simulation parameters				
重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	内摩擦角/ (°)	粘聚力/ kPa	泊松比
18	136	33	10	0.28

数值模拟、修正公式、原公式得到的松动土压力与埋深的关系曲线如图 10 所示:

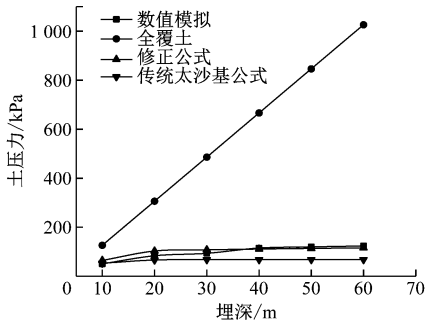


图 10 不同埋深隧道的松动土压力 ($\varphi=33^{\circ}$)

Fig. 10 Loosening earth pressure of tunnels at different buried depths ($\varphi=33^{\circ}$)

由松动土压力随埋深的变化曲线可以看出,随

着埋深的增大,松动土压力逐渐趋于稳定,增长较为缓慢。在埋深较浅时,太沙基松动土压力原公式计算得出的土压力值与数值模拟较为接近,随着埋深的增加,数值模拟与原公式计算的结果误差明显增大,而修正公式与数值模拟结果吻合良好,从而验证了本文理论推导的合理性。

4 结语

本文在文献[3]松动土压力公式的基础上,通过考虑主应力轴旋转以及内摩擦角对松动区高度的影响,对无黏性土和黏性土的太沙基松动土压力公式进行了参数修正,并将修正解与其他研究者的研究结果以及数值模拟结果进行了对比,得出了以下结论:

1) 深埋情况下,无黏性土松动土压力趋于稳定,通过考虑主应力轴旋转得到的修正公式与其他研究者的研究结果吻合良好,验证了修正公式的正确性。

2) 深埋情况下,数值模拟结果表明松动区高度会受到内摩擦角的影响,内摩擦角越大,松动区高度越小。考虑土体强度的松动区高度计算公式所得结果与相关文献结果吻合良好。

3) 深埋情况下,考虑松动区内双土拱的共同作用及覆径比对张开角的影响,修正了太沙基松动土压力公式,修正公式计算结果与数值模拟结果吻合良好且精度明显高于传统太沙基松动土压力公式。

参考文献

- [1] 李雪,周顺华,宫全美,等. 大断面深埋高水压地铁盾构隧道周边土压力作用模式评价[J]. 岩土力学,2015,36(5):1415.
LI Xue, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Evaluation of earth pressure around a deeply buried metro shield tunnel with a large cross-section under high water pressure conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1415.
- [2] KOYAMA Y. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2-3):145.
- [3] TERZAGHI K T. Theoretical soil mechanics [M]. New York: John Wiley and Sons, 1943:37-42.
- [4] 朱伟,钟小春,加瑞. 盾构隧道垂直土压力松动效应的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报,2008,30(5):750.
ZHU Wei, ZHONG Xiaochun, JIA Rui. Simulation on relaxation effect of vertical earth pressure for shield tunnels by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 750.
- [5] 陈若曦,朱斌,陈云敏,等. 基于主应力轴旋转理论的修正 Terzaghi 松动土压力[J]. 岩土力学,2010,31(5):1402.
CHEN Ruoxi, ZHU Bin, CHEN Yunmin, et al. Modified Terzaghi loosening earth pressure based on theory of main stress axes rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1402.
- [6] 汪大海,贺少辉,刘夏冰,等. 基于主应力旋转特征的浅埋隧道上覆土压力计算及不完全拱效应分析[J]. 岩土力学与工程学报,2019,38(6):1284.
WANG Dahai, HE Shaohui, LIU Xiabing, et al. A modified method for determining the overburden pressure above shallow tunnels considering the distribution of the principal stress rotation and the partially mobilized arching effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 38(6): 1284.
- [7] 黄园园,漆泰岳,王睿,等. 砂卵石地层重叠隧道开挖顺序优化研究[J]. 现代隧道技术,2013,50(5):52.
HUANG Yuanyuan, QI Taiyue, WANG Rui, et al. Optimization of the excavation sequence of overlapped tunnels in sandy cobble stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(5): 52.
- [8] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京:河海大学,2005.
QIN Jianshe. Study on face deformation and collapse of earth pressure shield tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [9] 胡欣雨,张子新. 基于开挖面实际破坏模式的盾构隧道稳定性分析模型[J]. 上海交通大学学报,2013,47(9):1469.
HU Xinyu, ZHANG Zixin. Calculation mode of shield tunneling stability based on real face failure modes[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(9): 1469.
- [10] WAN T, LI P, ZHENG H, et al. An analytical model of loosening earth pressure in front of tunnel face for deep-buried shield tunnels in sand [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 115:103170.
- [11] 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 & Underground Space Technology, 2018, 75:43.
- [12] 赖丰文,陈福全,万梁龙. 考虑不完全土拱效应的浅层地基竖向应力计算[J]. 岩土力学,2018,39(7):2546.
LAI Fengwen, CHEN Fuquan, WAN Lianglong. Vertical stresses of shallow foundations based on partially developed soil arching effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2546.
- [13] 徐长节,梁禄钊,陈其志,刘元昆. 考虑松动区内应力分布形式的松动土压力研究[J]. 岩土力学,2018,39(6):1927.
XU Changjie, LIANG Luju, CHEN Qizhi, et al. Research on loosening earth pressure considering the patterns of stress distribution in loosening zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 1927.
- [14] 加瑞. 盾构隧道垂直土压力松动效应的研究[D]. 南京:河海大学,2007.
JIA Rui. Study on relaxation effect of vertical soil pressure for shield tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.