

# 排桩支护明挖隧道基坑桩侧极限抗力系数研究

蒋冲<sup>1,2,3,†</sup>, 李天斌<sup>2</sup>, 梅松华<sup>3</sup>, 陈骅伟<sup>4</sup>, 陈兆<sup>4</sup>, 刘霖<sup>1</sup>, 沙策<sup>1</sup>

(1.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

2.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

3.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 水能资源利用关键技术湖南省省重点实验室, 湖南 长沙 410014;

4.湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008)

**摘要:**为了研究单排桩支护明挖隧道基坑桩侧土抗力系数特性,首先,建立了考虑桩侧土体受力状态的基坑桩侧土压力力学模型和位移模式;其次,根据虚功原理和位移场模式,建立排桩支护明挖隧道基坑桩侧土体功和速度场计算公式,引入极限上限方法,提出了考虑桩-土界面粗糙度系数的排桩支护明挖隧道基坑排桩的水平承载力系数计算方法,将该方法应用于计算实例,通过与已有理论计算方法对比分析,计算结果验证了本文方法的合理性与可行性;最后,利用本文建立的方法,分析了桩间距、桩-土接触面系数以及埋置深度对基坑排桩水平抗力系数的规律.结果表明:排桩的水平承载力随着桩距的减小而减小,直到达到一个最小值.排桩的水平承载力系数 $N_p$ 随着桩-土界面粗糙度系数 $\alpha$ 的增大而增大;当桩-土界面粗糙度系数 $\alpha$ 一定时,水平承载力系数 $N_p$ 随着埋置深度的增加而增加,当埋置深度率 $Z/D > 7$ 时,水平承载力系数 $N_p$ 随着埋置深度的增加趋于定值.

**关键词:**桩;基坑;极限侧向荷载;隧道

**中图分类号:**TU443

**文献标志码:**A

## Study on Pile Side Resistance Limit Coefficient of Row Pile Supported Ming Dig Tunnel Excavation Foundation Pit

JIANG Chong<sup>1,2,3,†</sup>, LI Tianbin<sup>2</sup>, MEI Songhua<sup>3</sup>, CHEN Huawei<sup>4</sup>, CHEN Zhao<sup>4</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>, SHA Ce<sup>1</sup>

(1.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3.Hunan Provincial Key Laboratory of Hydropower Development Key Technology, Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 4.Hunan Provincial Communications Planning Survey & Design Institute, Changsha 410008, China)

**Abstract:** In order to study the resistance characteristics of pile supported Ming dig tunnel excavation pile

\* 收稿日期:2017-02-24

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51478479,51678570), National Natural Science Foundation of China (51478479,51678570); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLP2014K008), Opening Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection(Chengdu University of Technology)(SKLP2014K008); 水能资源利用关键技术湖南省省重点实验室开放研究基金项目(PKLHD201404), Hunan Provincial Key Laboratory of Key Technology on Hydropower Development(PKLHD201404); 湖南省交通科技项目(201524), Hunan Province Transportation Science and Technology Project(201524)

**作者简介:**蒋冲(1977—),男,湖南邵阳人,中南大学副教授

† 通讯联系人, Email:jiang4107@sohu.com

lateral soil, mechanical model and displacement model are set up considering pile foundation pile lateral soil pressure in soil mass stress state. Secondly, according to the principle of function and displacement mode, the function and formula of velocity field for pile supported Ming dig tunnel excavation pile lateral soil is established. Then, through the introduction of extreme limit method, the coefficient calculation method is put forward considering the interface roughness coefficient of pile-soil pile horizontal bearing capacity of pile foundation pit supported Ming dig tunnel. At the same time, this method was applied to calculate examples. A comparative analysis between the theoretical calculation method and calculated results demonstrates the rationality and feasibility of this method. Finally, by using the method established in this paper, the influence of pile spacing, pile and soil contact surface coefficient and pile embedment depth of foundation pit on horizontal resistance coefficient is also analyzed. The results show that the horizontal bearing capacity of pile decreases with the decrease of the pile spacing and reaches to a minimum value. The level of the pile bearing capacity coefficient of  $N_p$  pile soil increases with the increasing interface roughness coefficient  $\alpha$ . When the pile-soil interface roughness coefficient  $\alpha$  is unchanged, the horizontal bearing capacity coefficient of  $N_p$  increases with the increase of buried depth. When the embedment depth ratio  $Z/D$  is larger than 7, the horizontal bearing capacity coefficient of  $N_p$  increases with the increase of embedment depth and reaches a constant value.

**Key words:** pile; foundation pit; ultimate lateral capacity; tunnel

隧道洞门口常采用明挖的方法进行开挖而形成基坑,工程则用单排桩或双排桩结构进行基坑支护,这种结构具有较大的侧向刚度,可以有效地限制围护结构地侧向变形,因而其围护深度比一般悬臂式围护结构深<sup>[1-2]</sup>.从结构上分析,具有施工方便、挡土结构受力效果好、不用设置内支撑等优点,因此在工程中得到了广泛应用<sup>[3]</sup>.为此国内许多学者对此进行了大量研究,提出了数值计算方法<sup>[4-6]</sup>、理论分析方法<sup>[7-9]</sup>.然后通常使用  $p-y$  曲线法来分析水平受荷桩群的水平承载能力, $p-y$  曲线法假设单桩水平极限承载力沿桩长均匀分布,单位长度上分布的大小为  $p$ ,引入群桩的  $p$ -multipliers 系数来考虑群桩效应的不利影响.大量的研究工作集中在确定在粘土中单桩上水平极限荷载( $p_u$ )是随着深度怎样分布的,未考虑桩侧尤其是排桩的水平极限承载力系数<sup>[10-12]</sup>.为此本文在深入分析桩侧土体受力状态的基坑桩侧土压力力学模型和位移模式基础上,进行排桩支护明挖隧道基坑桩侧极限抗力系数研究.

## 1 力学模型

如图 1 所示,基坑支护采用单排桩,桩径为  $D$ ,桩间距为  $d$ ,假设排桩在力的作用下以速度  $v$  向基坑方向移动.

排桩向基坑方向的水平位移速度假设为  $v$ ,综合分析排桩间土的位移与变形模式,主要包括速度  $v$  和桩一起沿着  $y$  轴方向平移的刚性区域( $EFT$ )、滑动扇形区( $EGF$ )和( $GACE$ )、绕着  $O$  点旋转的刚性区域( $ECBD$ )以及塑性变形区( $ACB$ )和( $ABH$ ),如图 2 所示. $y$  轴表示排桩向基坑方向水平位移方向, $x$  轴为垂直排桩速度方向, $Z$  点为两根桩间的中点,如图 1 所示.

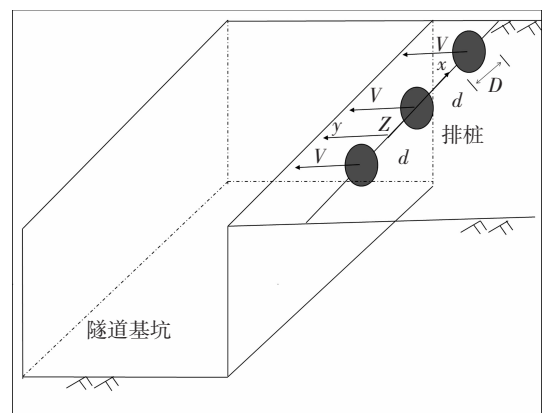


图 1 基坑排桩支护示意图

Fig.1 Row pile foundation pit supporting

## 2 土抗力计算

如图 2 所示,根据虚功原理与基于上限定理的

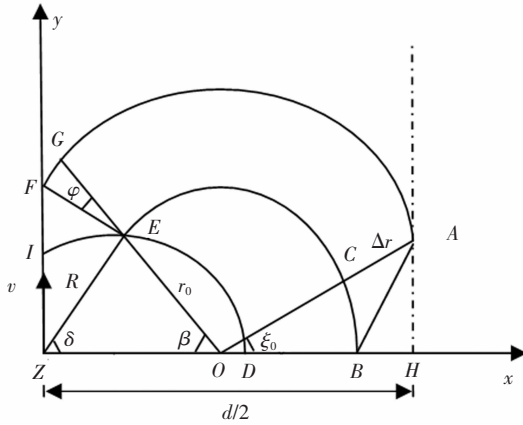


图 2 力学模型与变形模式

Fig.2 Mechanical model and deformation model

塑性极限分析方法可以知,特定的力学模型位移模式的确定取决于内外应力所做的功. 由于排桩和土体相互作用,只有外力作用在桩上,可以通过式(1)得到相应的不排水桩侧极限承载力:

$$p_u = W_p / V_0 = N_p S_u D \quad (1)$$

式中:  $W_p$  为每根桩作用范围内应力所做功的总功率;  $V_0$  为桩的水平速度;  $N_p$  为给定桩距和桩土粘结系数(桩土界面粗糙度系数)的承载力系数,  $S_u$  为土的不排水抗剪强度;  $D$  为桩径;  $P_u$  为桩侧极限土抗力.

由式(1)可知,为了求解排桩的桩后极限承载力,下一步需建立每根桩作用范围内应力所做功的总功  $W_p$  和桩的水平速度  $V$  的求解方法,现分别加以介绍.

### 3 功的计算

结合桩间土体的位移模式(见图 2),可分别建立滑动扇形区(EGF)和(GACE)以及塑性变形区(ACB)和(ABH)的功能方程.对于速度不连续面和塑性变形区的功率分别是:

$$P_v = \tau_i \int_0^{L_i} |v_i| dl \quad (2)$$

$$P_s = s_u \int_A |\dot{\gamma}| dA \quad (3)$$

式中,  $v_i$  为相对速度;  $L_i$  为结构面  $i$  的长度;  $\dot{\gamma}$  为剪切应变率;  $\tau_i$  为结构面的极限剪切应力,这种机构中,  $y$  轴是关于速度的一个对称面,  $x$  轴是关于速度的一个反对称面,所以只需选取机构的四分之一进行分析. 位移模式的四分之一的总功率包括滑动扇形区

(EGF)和(GACE)以及塑性变形区(ACB)和(ABH)所做的功.

滑动扇形区 GACE:

$$W_{GACE} = 2s_u v_0 R \frac{\cos \delta}{\cos(\beta - \psi)} \times \quad (4)$$

$$(\pi - \beta - \xi_0) \cos(\beta - \psi)$$

滑动扇形区 EGF:

$$W_{EDF} = 2s_u v_0 R \frac{\cos \delta}{\cos(\beta - \psi)} \psi \cos(\beta - \psi) \quad (5)$$

塑性变形区 ABH:在直角坐标系中剪切应变率通过下式给定

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{x} \quad (6)$$

由此可求得,

$$\dot{\gamma} = -v_0 \cos(2\xi_0) \left( \frac{1}{\lambda R} - \frac{\cos(\beta - \psi)}{r_0} \right) \times \left( \frac{\cos(\xi_0 + \xi_1)}{\sin \xi_0 \sin \xi_1} \right) \quad (7)$$

联立式(6)和式(7)得到剪切应变率式(8):

$$v = v_0 \cos(2\xi_0) \left[ \frac{r_0}{\lambda R \cos \xi_0} - \cos(\xi_0 - \xi_1) \times \left( \frac{1}{\lambda R} - \frac{\cos(\beta - \psi)}{r_0} \right) \times \left( \frac{\frac{s}{2} - \lambda R}{\cos \xi_0 \cos \xi_1} + \frac{x}{\sin \xi_0 \sin \xi_1} \right) \right] \quad (8)$$

所以塑性变形区(ABH)的功率为:

$$W_{ABH} = v_0 s_u \cos(2\xi_0) \left( \frac{1}{\lambda R} - \frac{\cos(\beta - \psi)}{r_0} \right) \times \left( \frac{\cos(\xi_0 + \xi_1)}{\sin \xi_0 \sin \xi_1} \right) \frac{\sin \xi_1}{2} \left( \frac{\Delta r}{\sin(\xi_0 + \xi_1)} \right)^2 \quad (9)$$

塑性变形区 ACB:联立式(7)、式(11)和式(12)得到剪切应变率

$$v_x' = v_0 \left[ \cos(\beta - \psi) + \frac{1}{\lambda R \tan \xi_0} - \frac{\cos(\beta - \psi)}{r_0 \tan \xi_0} \cdot x \right] \quad (10)$$

$$v_y' = -v_0 \left[ \frac{x'}{\lambda R} + \frac{\cos(\beta - \psi) \tan \xi_0}{r_0 \tan \xi_0 \tan(\xi_0 + \xi_1)} \cdot y_1' \right] \quad (11)$$

$$\dot{\gamma} = -\frac{v_0}{\lambda R} \quad (12)$$

所以塑性变形区(ACB)的功率为:

$$W_{ACB} = v_0 s_u R \frac{\cos \delta}{\cos(\beta - \psi)} \frac{r_0 \tan \xi_0}{2 \lambda R} \quad (13)$$

### 4 速度场确定

由图 2 的几何条件可得,扇形滑动区(EFG)的速度由结构面 EF 的倾向控制.

$$v = v_0 \cos(\beta - \psi); \Delta v = v_0 \sin(\beta - \psi) \quad (14)$$

因为结构面 EG 的延长线分别通过扇形滑动区(EFG)和(GACE)的中心点 E 和点 O,EG 上不会发生速度跳跃,所以区域(GACE)的速度可以用式(15)得出.

刚性旋转区(ECDB)为:

$$v = \frac{v_0}{\lambda R} r \text{ 和 } \Delta v = \frac{v_0}{\lambda} \quad (15)$$

式中, r 为在 ECB D 区域内任意点到旋转中心点 O 的距离.

区域 ACB 的速度场用式(10)和式(11)描述,该速度场给出了应变不连续面 AB 上的垂直合速度,它也规定了区域 AHB 的速度场.

### 5 验证与讨论

便于分析,对式(1)进行变化即得:

$$N_p = W_p / V_0 S_u D \quad (16)$$

为了验证本文提出方法的正确性,引入 Randolph 和 Houlsby<sup>[8]</sup>提出的下限界分析方法进行验证分析.计算参数如表 1 所示.

表 1 计算参数

Tab.1 Calculated parameters

L/m	D/m	c <sub>u</sub> /kPa	γ/(kN·m <sup>-3</sup> )	α
10	1	50	18	0,1
13	1	50,	18	0,1
13	0.5	50	18	0.3,0.6,0.9
18	1	50	18	0,1
18	1	50,	18	0,1
20	1	50	18	0.2,0.4,0.6,0.8
20	1	50	18	0,1
20	0.5	50	18	0.3,0.6,0.9
20	2	50	18	0.2,0.4,0.6,0.8

图 3~图 6 为桩-土界面粗糙度系数 α = 0、0.45、0.75 和 1 时水平承载力系数 N<sub>p</sub> 与桩间距 d 和桩径 D 比值的关系曲线. 由图 3~图 5 可以得出,本文结果与 UB 方法基本吻合,且计算方便,参数较

少,验证了本文方法的合理性.尤其当 d/D < 2 时,两者结果几乎接近,当 d/D > 2 时,本文方法计算所得水平承载力系数 N<sub>p</sub> 大与 UB 方法.由图 3~图 6 可以发现,当桩土界面粗糙度系数 α = 0、0.45、0.75 和 1, d/D 分别大于 3.5、4.0、4.5 和 5.0 时,明挖隧道段基坑排桩基本不存在群桩效应.

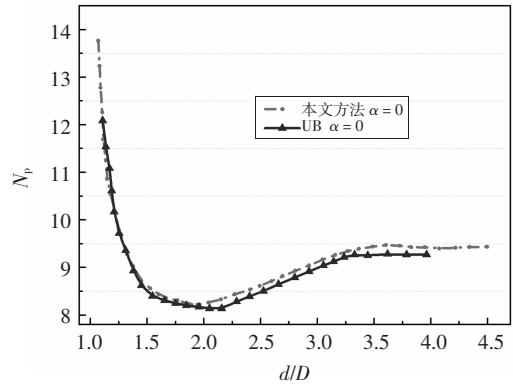


图 3 α = 0 水平承载力系数 N<sub>p</sub> 曲线

Fig.3 Bearing capacity coefficient of N<sub>p</sub> curve, α = 0

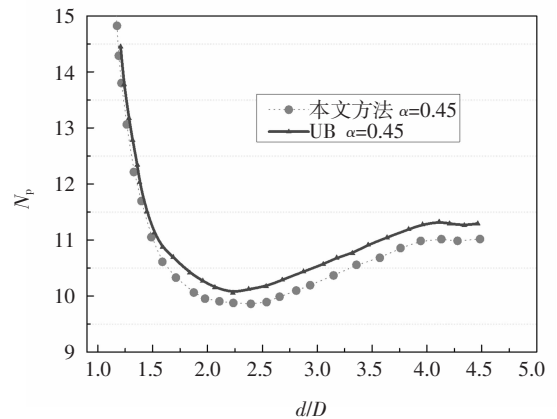


图 4 α = 0.45 水平承载力系数 N<sub>p</sub> 曲线

Fig.4 Bearing capacity coefficient of N<sub>p</sub> curve, α = 0.45

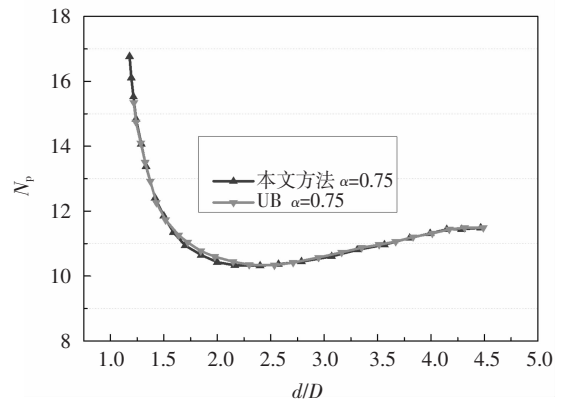


图 5 α = 0.75 水平承载力系数 N<sub>p</sub> 曲线

Fig.5 Bearing capacity coefficient of N<sub>p</sub> curve, α = 0.75

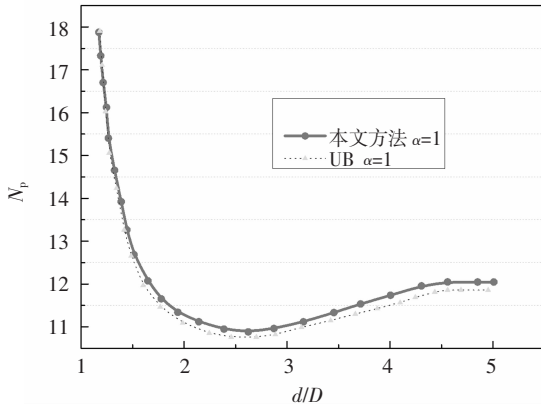


图 6  $\alpha = 1.0$  水平承载力系数  $N_p$  曲线图

Fig.6 Bearing capacity coefficient of  $N_p$  curve,  $\alpha = 1$

图 7 为桩土界面粗糙度系数  $\alpha = 0、0.3、0.6、0.9$  和 1 时水平承载力系数  $N_p$  与桩间距  $d$  和桩径  $D$  比值的关系曲线.由图 7 可以看出,排桩的水平承载力系数  $N_p$  随着桩距的减小而减小,直到达到一个最小值(此时桩距介于  $1.5D$  和  $2.5D$  之间,具体视桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  定),其主要原因可能是群桩效应的影响.对于  $d/D$  为较小值时,极限抗力系数随着  $d/D$  的减小迅速增加,当标准化桩距  $d/D = 1$  时(桩与桩相互接触),极限抗力增加到无穷大,桩是相互紧挨着的形成了一道连续墙,所以不会在土中形成失效机制.而且,水平承载力系数  $N_p$  随着桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  的增大而增大.

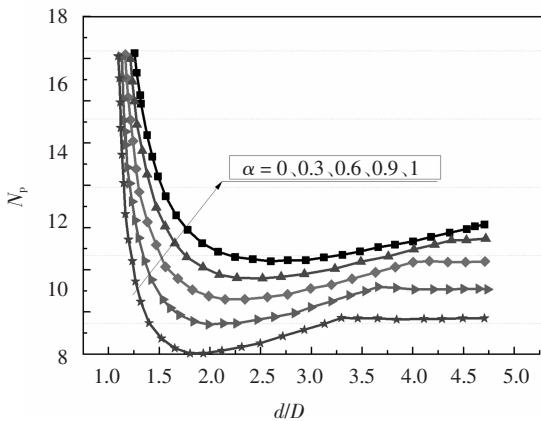


图 7  $\alpha$  与水平承载力系数  $N_p$  关系曲线

Fig.7 Relation curve of  $\alpha$  and horizontal bearing capacity coefficient  $N_p$

图 8 为水平承载力系数  $N_p$  与埋置深度率  $Z/D$  的关系曲线图.由图 8 可知,相同的埋置深度,排桩

的水平承载力系数  $N_p$  随着桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  的增大而增大;当桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  一定时,水平承载力系数  $N_p$  随着埋置深度的增加而增加,当埋置深度率  $Z/D > 7$  时(具体视桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  定),水平承载力系数  $N_p$  随着埋置深度的增加而变化不大,趋于定值.

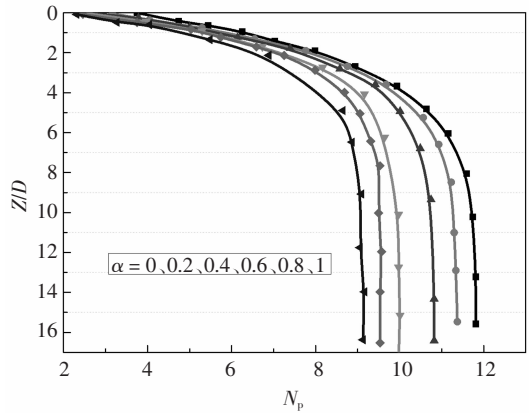


图 8 埋深及水平承载力系数  $N_p$  关系曲线

Fig.8 Relation curve of buried depth and horizontal bearing capacity coefficient  $N_p$

### 6 结 论

关于桩侧土压力问题的研究已有很多报道,相关的桩侧土压力计算方法和程序也有多种.本文用塑性极限分析上限法研究作用于排桩支护明挖隧道基坑排桩上的极限水平土压力.主要得出如下结论:

- 1) 针对排桩支护明挖隧道基坑排桩工程特点,建立了基坑排桩桩侧土体力学模型和土体变形与位移模式,在此基础上,提出了桩与土体功能计算方法和土体速度场确定方法.
- 2) 研究显示排桩的水平承载力随着桩距的减小而减小,直到达到一个最小值(此时桩距介于  $1.5D$  和  $2.5D$  之间,具体视桩土粘结系数定).对于  $d/D$  为较小值时,极限抗力随着  $d/D$  的减小迅速增加,当标准化桩距等于 1 时(桩间相互接触),极限抗力增加到无穷大.
- 3) 相同的埋置深度,排桩的水平承载力系数  $N_p$  随着桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  的增大而增大;当桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  一定时,水平承载力系数  $N_p$  随着

埋置深度的增加而增加,当埋置深度率  $Z/D > 7$  时(具体视桩土界面粗糙度系数  $\alpha$  定),水平承载力系数  $N_p$  随着埋置深度的增加趋于定值。

## 参考文献

- [1] 顾问天. 深基坑双排桩支护结构的研究[D]. 北京: 铁道科学研究院, 2007: 87—92  
GU W T. Retaining structure research of double row piles of deep foundation pit [D]. Beijing: Railway Science Research Institute, 2007: 87—92. (In Chinese)
- [2] 余志成, 施文华. 深基坑支护设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 188—189.  
YU Z C, SHI W H. Design and construction of deep foundation excavation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2002: 188—189. (In Chinese)
- [3] 金造时, 魏东. 双排桩在武汉地区深基坑支护中的应用探讨[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(2): 141—143.  
JIN Z S, WEI D. Discussion on application of double-row piles in deep foundation pit support [J]. Resources Environment and Engineering, 2010, 24(2): 141—143. (In Chinese)
- [4] 崔宏环, 张立群, 赵国景. 深基坑开挖中双排桩支护的三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 662—666.  
CUI H H, ZHANG L Q, ZHAO G J. Numerical simulation of deep foundation pit excavation with double-row piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 662—666. (In Chinese)
- [5] 赵明华, 雷勇, 刘晓明. 基于剪切位移法的桩基负摩阻力计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(7): 1—6.  
ZHAO M H, LEI Y, LIU X M. Settlement calculation of single pile's negative skin friction with shear displacement method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(7): 1—6. (In Chinese)
- [6] 蔡袁强, 赵永倩, 吴世明, 等. 软土地基深基坑中双排桩式围护结构有限元分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 1997, 31(4): 442—448.  
CAI Y Q, ZHAO Y Q, WU S M, *et al.* FEM analysis of the deep pit excavation with retaining structure of the double piles in soft clay [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1997, 31(4): 442—448. (In Chinese)
- [7] 周翠英, 刘柞秋, 尚伟. 门架式双排抗滑桩设计计算新模式[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 441—445.  
ZHOU C Y, LIU Z Q, SHANG W. A new mode for calculation of portal double row anti-sliding piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 441—445. (In Chinese)
- [8] 杨明辉, 杨学文, 赵明华. 黏性土中倾斜荷载下抗拔桩的模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(11): 13—19.  
YANG M H, YANG X W, ZHAO M H. Study of model experiments on uplift piles in clay under oblique loads[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(11): 13—19. (In Chinese)
- [9] 孙勇. 滑坡面下双排抗滑结构的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2971—2977.  
SUN Y. Research on calculation method of double-row anti-sliding structure under sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2971—2977. (In Chinese)
- [10] 聂庆科, 胡建敏, 吴刚. 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3089—3094.  
NIE Q K, HU J M, WU G. Deformation and earth pressure of a double-row piles retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3089—3094. (In Chinese)
- [11] GEORGIADIS K, SLOAN S W, LYAMIN A V. Undrained limiting lateral soil pressure on a row of piles[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 54(7): 175—184.
- [12] CHANDRASEKARAN S S, BOOMINATHAN A, DODAGOUDAR G R. Group interaction effects on laterally loaded piles in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2010, 136(4): 573—582.