

# 非等长双排桩在武汉地区基坑工程中的应用

胡 刚<sup>1</sup>, 胡福洪<sup>2</sup>, 黄佛光<sup>3</sup>

(1.中匠民大国际工程设计有限公司恩施分公司,湖北 恩施 445000;

2.武汉地质勘察基础工程有限公司,湖北 武汉 430072; 3.武汉理工大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

**摘要:**以武汉仁恒公园世纪深基坑支护项目为研究背景,通过设置前长后短非等长双排桩进行基坑支护,并利用天汉设计软件对该项目的某一个支护段进行设计计算分析。结果表明:该支护段的前后排桩的最大位移为 37.9 mm,在地面以下 1.0 m 处(即桩顶),被动区弹性抗力安全系数为 3.90。而本项目基坑预警控制指标为支护结构水平位移 $\leq 40$  mm,能够满足设计监测要求,为以后非等长双排桩在基坑中的应用提供参考借鉴。

**关键词:**基坑支护;非等长双排桩;桩顶位移;武汉地区

**中图分类号:**TU473 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2020)02-0078-05

## Application of unequal length double-row piles in a foundation pit project in Wuhan

HU Gang<sup>1</sup>, HU Fuhong<sup>2</sup>, HUANG Fuguang<sup>3</sup>

(1.Enshi Branch of China National Minda International Engineering Design Co., Ltd., Enshi Hubei 445000, China;

2.Wuhan Geological Prospecting Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430072, China;

3.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

**Abstract:** Taking the deep foundation pit support project of Wuhan Renheng Park Century as the research background, design calculation and analysis is conducted with Tianhan Design Software on some support section of the project, where the foundation pit was supported by unequal double-row piles, that is, the front row piles were longer and the rear row piles were shorter. The results of calculation and analysis shows that the maximum displacement of the front row and rear row piles of the support section is 37.9mm, that occurs at 1.0m below the ground (at the top of the pile), and the elastic resistance safety factor in the passive zone is 3.90. The early warning control index for the foundation pit of this project is the horizontal displacement of the supporting structure not greater than 40mm, which can meet the design monitoring requirements and provide reference for the future application of unequal length double-row piles in the foundation pit.

**Key words:** foundation pit support; unequal length double-row piles; pile top displacement; Wuhan area

## 0 引言

随着城市建筑大量的开发建设,施工场地和用地红线的限制,对基坑开挖变形提出了越来越高的要求,基坑开挖过程中,新型的支护形式应用越来越常见<sup>[1-2]</sup>。双排桩是一种新型的支护结构,是由两排平行排列的钢筋混凝土桩以及在桩顶的圈梁和连梁组成的空间围护结构体系。它通过连梁的约束作用和桩间土相互作用,使其侧向刚度大、位移小、内力分布较均匀<sup>[3]</sup>,因而在基坑和边坡支护工程中得

到广泛应用。国内已有众多学者在理论、室内模型试验、数值模拟等方面对双排桩支护开展了大量的研究。

在理论分析方面,戴智敏等<sup>[4]</sup>、黄先伍等<sup>[5]</sup>考虑包括桩间土体作用等因素对双排桩的内力和变形进行理论计算,并通过工程实际应用验证分析计算模型的可行性;牟春梅等<sup>[6]</sup>利用平面刚架结构模型进行计算,双排桩支护能满足深基坑工程应达到地下室及主体结构不承担基坑侧壁回填土传递的土压力

收稿日期:2019-04-10; 修回日期:2019-11-27 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.02.013

作者简介:胡刚,男,汉族,1988年生,工程师,湖北省恩施市。

通信作者:胡福洪,男,汉族,1989年生,工程师,硕士,岩土工程专业,主要从事地基基础设计及施工工作,湖北省武汉市武昌区八一路463号,964114961@qq.com。

引用格式:胡刚,胡福洪,黄佛光.非等长双排桩在武汉地区基坑工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):78-82.

HU Gang, HU Fuhong, HUANG Fuguang. Application of unequal length double-row piles in a foundation pit project in Wuhan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):78-82.

的要求,并且有良好效果;黄凭等<sup>[7]</sup>通过建立和求解各段桩体的挠曲微分方程,最终利用求导的方法求出双排桩各点的变形及内力情况。

在室内和现场试验方面,彭文祥等<sup>[8]</sup>通过对 4 种排距的双排桩支护结构进行室内模型试验,试验结构表明:当桩径为 600~1200 mm 双排桩支护结构排距为 3~4 倍桩径时为最合理。

在数值模拟方面,丁洪元等<sup>[9]</sup>通过建立三维仿真计算模型对双排桩的受力和位移特性进行计算,得到该软土基坑工程双排桩支护结构的最佳排间距、桩径和桩长。结果表明:当双排桩桩径取 0.8~1.0 m、排间距取桩径的 3~4 倍时,排桩的弯矩分布和桩身的位移比较合理,可以最大化地发挥双排桩的支护作用;相比于后排桩桩长,增加前排桩的桩长对提高支护结构的稳定性更有效。唐印<sup>[10]</sup>、邱佳荣等<sup>[11]</sup>以成都地区某基坑项目为背景,利用 MIDAS-GTS 有限元分析软件对双排桩支护结构的受力性状和前后桩长不等的情况进行建模分析,研究双排桩的最优设计参数,并提出了非等长双排桩在成都膨胀土基坑工程中的应用,最后以典型工程为例,对支护结构进行模拟计算,并结合监测数据验证了方案的合理性。荣玲<sup>[12]</sup>通过室内模型试验研究了新型门架式不等长双排桩的合理性,以及在不同排距、桩长差等因素下的极限支护抗力、桩顶水平位移曲线、桩身弯矩以及桩前、桩间和桩后土压力等,试验结果表明这种前排桩长于后排桩的布桩形式对于提高门架式双排桩的极限支护抗力以及限制桩顶水平位移变形更加有利。

当前在基坑支护实际工程中,对等长双排桩的应用和研究很多,已经近乎成熟且已得到广泛应用,但非等长双排桩的研究和应用还比较少,这方面的研究还有待进一步深入。本文在原有的等长双排桩的基础上,并依托于武汉地区实际基坑项目对非等长双排桩的实际效果进行评估分析,对非等长双排桩的可靠性进行验证。

## 1 工程概况

### 1.1 基本概况

拟建武汉仁恒公园世纪工程场地位于武汉江岸区市民之家西侧,场地地形略有起伏,勘察时地面高程为 20.14~26.23 m(以孔口高程计)之间,呈北高南低之势。场地地貌单元属长江左岸 II 级阶地前

缘。项目用地面积约 35195.5 m<sup>2</sup>,总建筑面积约 206250.00 m<sup>2</sup>。地上为 3 栋高层(28F~32F)、4 栋超高层(41F、45F)公共服务设施配套用房等,计容面积为 144000 m<sup>2</sup>,地下面积为 62250 m<sup>2</sup>(2F)。

### 1.2 基坑规模与支护形式

基坑边线平面呈近似长方形,基坑面积约 30400 m<sup>2</sup>,基坑周长约 800 m。支护范围内自然地面标高为 21.20 m,基坑计算开挖深度为 9.1~10.5 m。依湖北省地方标准《基坑工程技术规程》(DB 42/159-2012)第 4.0.1 条<sup>[13]</sup>,结合场地环境条件与工程地质、水文地质条件及基坑开挖深度等条件综合考虑,基坑工程重要性等级可定为一,基坑支护平面布置如图 1 所示。

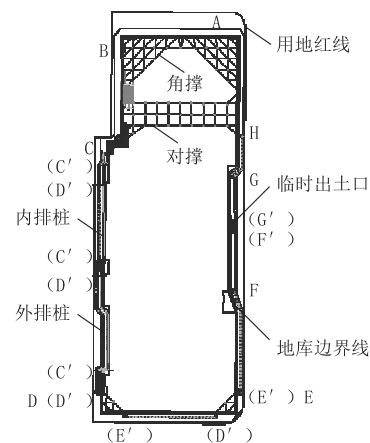


图 1 基坑支护平面布置

Fig.1 Foundation pit support plan

C'D'段支护桩桩顶采用整体冠梁,冠梁尺寸为 1400 mm×1000 mm,设计的桩身和冠梁混凝土强度等级为 C30。C'D'段支护桩示意图如图 2 所示。

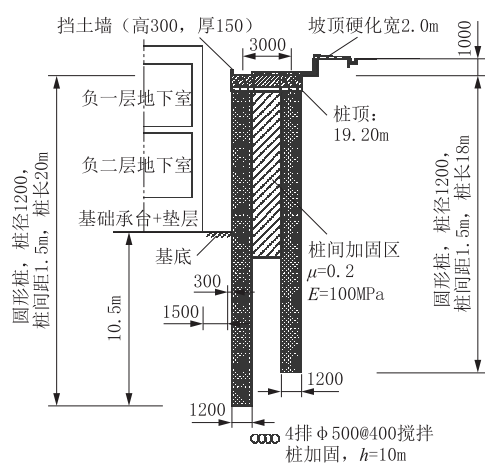


图 2 非等长双排桩示意

Fig.2 Schematic diagram of the unequal length double-row piles

## 2 设计计算和参数选择

以C'D'段非等长双排桩为背景,利用天汉基坑设计软件<sup>[14]</sup>对C'D'段双排桩进行结构设计计算。基

坑开挖深度及其影响范围内,各土层的基坑设计物理力学参数值如表1所示。依据设计图纸和勘察报告,设计的综合参数和桩间土加固参数如表2~3所示。

表1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

地层代号	岩土名称	土层厚度/m	密度或状态	天然重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	总应力指标		静止侧压力系数 $k_0$	渗透系数 $k$ / ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
					内摩擦角 $\varphi_k$ /( $^\circ$ )	内聚力 $c_k$ /kPa		
①	杂填土	6.5	松散—稍密	17.2	18	8	0.70	$2.2 \times 10^{-3}$
② <sub>1-a</sub>	淤泥	4.0	流塑	16.1	4	12	0.80	$1.7 \times 10^{-7}$
② <sub>1-b</sub>	粘土	2.6	软—可塑	17.6	8	16	0.55	$3.4 \times 10^{-7}$
② <sub>2</sub>	粘土	2.8	可塑	18.7	13	23	0.48	$6.2 \times 10^{-7}$
② <sub>3</sub>	粘土	8.9	硬塑	19.5	16	35	0.43	$2.6 \times 10^{-6}$
② <sub>4</sub>	粉质粘土	3.4	可塑	19.1	15	30	0.46	$5.2 \times 10^{-5}$
③	含砾细砂	5.4	中密		35	0		
④	含砾粉质粘土	4.3	硬塑	20.0	16	40		

注:(1) $c_k$ 、 $\varphi_k$ 是根据湖北省地方标准《基坑工程技术规程》(DB 42/T 159—2012)查表确定的总应力指标;(2)杂填土及粘性土渗透系数为经验值,人工填土及砂土层的静止侧压力系数为经验值。

表2 C'D'段设计的综合参数

Table 2 Comprehensive designed parameters for the C'D' section

项 目	参 数	项 目	参 数
引用钻孔号	JK22	结构正负零标高/m	22.350
计算坡顶标高/m	21.200	结构正负零高差/m	1.15
计算开挖深度/m	10.5	基底标高/m	10.700(-11.650)
基坑等级	一级	临时结构调整系数	1
支护结构类型	双排桩	土压力分布模式	朗肯土压力模式
水土压力计算方法	总应力法	被动土压力折减系数	1

表3 C'D'段桩间土加固参数

Table 3 Reinforcement parameters of soil between the piles at C'D' section

项 目	参 数	项 目	参 数
顶标高(埋深)/m	-3.15(2)	底标高(埋深)/m	-13.15(12)
到前桩距/m	0	到后桩距/m	0
加固区高/m	10	加固区宽/m	1.8
加固区变形模量/MPa	100	加固区泊松比	0.2

非等长双排桩采用C30混凝土钻孔灌注桩,前排桩桩长为20 m,后排桩桩长为18 m,双排桩的排距为3.0 m,桩间距均为1.5 m,双排桩的详细设计参数如表4所示。

## 3 计算结果及分析

该项目基坑重要性等级为一级,临时支护结构调整系数为1.00,采用总应力法(水土合算)且被动区无加固,C'D'段桩坡顶放坡共1项,坡的总高1 m,平台宽1 m。最大开挖深度10.5 m,前排桩结构的设计桩长为20 m,嵌入坑底深度10.5 m;后排桩结构设计桩长18 m,嵌入坑底深度8.5 m。其内力计算结果如表5所示。另外设计计算的位移图、土压力图、弯矩图和剪力图如图3~6所示。

表4 C'D'段前后排桩的设计参数

Table 4 Design parameters of the front row and rear row piles at C'D' section

桩位置	桩顶相对标高/m	桩长/m	桩间距/m	截面类型	桩径/m	截面积/ $\text{m}^2$	惯性矩/ $\text{m}^4$	弹性模量/GPa	桩底弹簧刚度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
前排桩	-2.15	20	1.5	圆桩	1.2	1.1309	0.101787	30	500000
后排桩	-2.15	18	1.5	圆桩	1.2	1.1309	0.101787	30	500000

表5 C'D'段前后排桩的内力计算结果

Table 5 Calculation results of internal forces of front row and rear row piles at C'D' section

桩位置	最大正弯矩		最大负弯矩		最大正剪力		最大负剪力	
	数值/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	地面以下位置/m	数值/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	地面以下位置/m	数值/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	地面以下位置/m	数值/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	地面以下位置/m
前排桩	821	14.4	-335	4.7	286	12.0	-174	18.0
后排桩	185	13.5	-322	1.0(桩顶)	67	13.5	-51	1.0(桩顶)

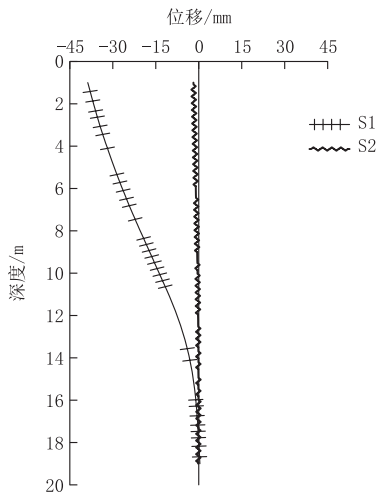


图 3 前后排桩位移

Fig.3 Displacement of front row and rear row piles

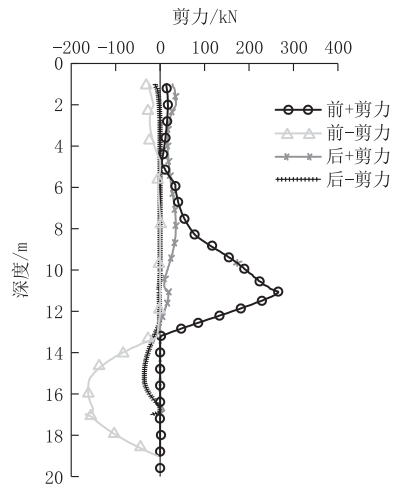


图 6 前后排桩剪力

Fig.6 Shear force of front row and rear row piles

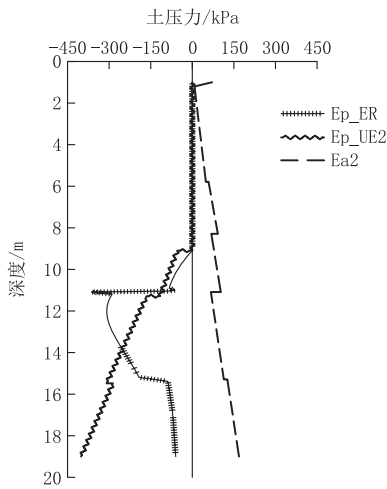


图 4 C'D'处基坑土压力

Fig.4 Earth pressure at C'D' section of the foundation pit

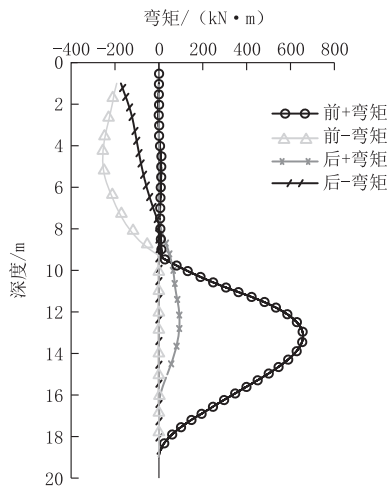


图 5 前后排桩弯矩

Fig.5 Bending moment of front row and rear row piles

由表 5 可知,前后双排桩的最大正弯矩在地表下 14.4 和 13.5 m 的位置,最大的正剪力在 12.0 和 13.5 m 的位置,均在基坑开挖深度下 1/2 开挖深度 (10~15 m) 范围内,支护桩设计桩长在剩余部分的长度的弯矩和剪力均较小,故设计成非等长双排桩是经济合理的。

C'D'段基坑的开挖深度为 10.5 m,由图 3 可知,基坑底处支护桩的位移为 15.4 m,C'D'段前后排桩的最大位移为 37.9 mm,在地面以下 1.0 m 处 (即桩顶),而在本项目基坑中的预警控制指标为支护结构水平位移 ≤ 40 mm,能够满足设计监测要求。

基坑底面以下土压力分布模式有 4 种假定,即“土压力零点分布”模式、“零分布”模式、“梯形分布”模式和“矩形分布”模式,秦四清等<sup>[15]</sup>认为在实际工程设计时一般采用“矩形分布”模式,其值取坑底处土压力值,且这种分布模式较安全。根据温克尔理论,被动区弹性抗力安全系数计算方式如式(1)所示。

$$K_p = E_p / \delta \quad (1)$$

式中:  $K_p$ ——被动区抗力系数, kPa/mm;  $E_p$ ——基坑底处被动土压力, kPa;  $\delta$ ——基坑底变形, mm。

由图 4 可知,基坑底处被动土压力为 60 kPa,被动区弹性抗力安全系数为 3.90,符合相关规范要求。

由图 5 和图 6 可知,在基坑底面以上,前排桩的弯矩值为 -335 kN·m,后排桩的弯矩值为 -322 kN·m,而在基坑开挖面以下,前排桩的最大正弯矩为 821 kN·m,后排桩为 185 kN·m,表明在基坑底部,由于冠梁、搅拌桩、双排桩三者形成一个有机的整体,共同受力;而在基坑底面,由于前排桩受

到下部土体的主动力的作用,开始由前排桩独自受力,故其最大正弯矩较大。前排桩最大的正剪力和最大负剪力分别为 286 和 -174 kN,位置分别在基坑底面和后排桩的底部附近。

#### 4 结论

本文通过支护桩设计和天汉软件模拟,探究该前后长短非等长双排桩的合理性,并研究其桩顶水平位移曲线、桩身弯矩以及剪力等,并得到以下结论:

(1)通过多级支护结构的使用,在本项目中减少了大面积设置内支撑,能够有效地解决传统桩撑支护造价高、工期长、拆除支撑产生的固体废弃物易造成环境污染等多方面的问题,双排桩支护结构取得了良好的支护效果,表明其在深基坑支护工程中具有广泛的应用前景,有益于进一步研究双排桩的工作。

(2)通过天汉设计软件设计验算,C'D'段前后排桩的最大位移为 37.9 mm,在地面以下 1.0 m 处(即桩顶),被动区弹性抗力安全系数为 3.90。而在本项目基坑中的预警控制指标为支护结构水平位移  $\leq 40$  mm,能够满足设计监测要求。

(3)天汉设计计算软件结果表明,这种前排桩长于后排桩的布桩形式对于提高双排桩的极限支护抗力以及限制桩顶水平位移变形更加有利,但前排桩桩身承担了较大的桩身内力,所以在工程中我们可以采取加大前排桩的直径或者配筋的同时减小后排桩的直径或配筋的布桩形式,从而达到调节前后排桩上的内力分配的目的,进一步使两桩受力更加接近,更好发挥前后排桩的协同作用。

#### 参考文献(References):

- [1] 李佳.软土基坑双排桩支护结构的变形性状分析[J].建筑技术,2017,48(9):960-963.  
LI Jia. Analysis of deformation behavior of double-row piles in soft-soil excavation [J]. Architecture Technology, 2017, 48(9):960-963.
- [2] 林书成,周振荣,唐咸远.复杂环境中深基坑综合支护设计与施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):70-74.  
LIN Shucheng, ZHOU Zhenrong, TANG Xianyuan. Design of comprehensive supporting for deep foundation pit in complex environment and the construction technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(1):70-74.
- [3] 魏天乐.双排桩在南京地区基坑支护中的设计应用[J].岩土工程技术,2017,31(4):200-204.  
WEI Tianle. Design and application of double row pile in foundation pit support in Nanjing area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017,31(4):200-204.
- [4] 戴智敏,阳凯凯.深基坑双排桩支护结构体系受力分析与计算

- [J].信阳师范学院学报(自然科学版),2002,15(3):348-352.  
DAI Zhimin, YANG Kaikai. Analysis and calculation of retaining structure with double-row piles[J]. Journal of Xinyang Teachers College (Natural Science Edition), 2002,15(3):348-352.
- [5] 黄先伍,李天珍,马林.边坡支护双排桩变形和内力的解析分析[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2014(4):56-60.  
HUANG Xianwu, LI Tianzhen, MA Lin. An analytical solution to the deformation and internal force of double-row piles in slope support[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2014(4):56-60.
- [6] 牟春梅,董文专,邱贤辉,等.双排桩在深基坑支护中的应用[J].路基工程,2014(5):49-52.  
MU Chunmei, DONG Wenzhuan, QIU Xianhui, et al. Application of double-row piles in deep foundation pit support[J]. Subgrade Engineering, 2014(5):49-52.
- [7] 黄凭,莫海鸿,陈俊生.双排桩支护结构挠曲理论分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3870-3875.  
HUANG Ping, MO Haihong, CHEN Junsheng. Theoretical analysis of double-row piles retaining structure deflection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(S2):3870-3875.
- [8] 彭文祥,刘彬.深基坑双排桩支护排距室内模型试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):121-127.  
PENG Wenxiang, LIU Bin. Indoor model test study on row spacing of double-row piles supporting deep excavation pit[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018,45(1):121-127.
- [9] 丁洪元,昌钰,陈斌.软土深基坑双排桩支护结构的影响因素分析[J].长江科学院院报,2015,32(5):105-109.  
DING Hongyuan, CHANG Yu, CHEN Bin. Factors affecting double-row piles in deep soft soil foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(5):105-109.
- [10] 唐印.非等长双排桩在成都膨胀土基坑工程中的应用研究[D].成都:成都理工大学,2016.  
TANG Yin. Research on the application of non-equal length double-row piles in the foundation pit engineering of Chengdu expansive soil[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [11] 邱佳荣,陈征宙,胡谢飞,等.基坑工程中双排桩支护结构的应用分析[J].建筑科学,2013,29(7):104-108.  
QIU Jiarong, CHEN Zhengzhou, HU Xiefei, et al. Application analysis of retaining structure with double-row piles in excavation engineering[J]. Building Science, 2013,29(7):104-108.
- [12] 荣玲.门架式不等长双排桩模型试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.  
RONG Ling. Model test of unequal double-row pile with mast [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [13] DB 42/T 159-2012,基坑工程技术规程[S].武汉:湖北省住房与城乡建设厅,湖北省质量技术监督局,2012.  
DB 42/T 159-2012, Technical specification for engineering of foundation excavation[S].
- [14] 陈卫华,胡福洪,陈锋.基于边坡稳定性计算方法比较分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(9):71-74.  
CHEN Weihua, HU Fuhong, CHEN Feng. Comparative analysis on the calculation methods on slope stability[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(9):71-74.
- [15] 秦四清.基坑支护设计的弹性抗力法[J].工程地质学报,2000,8(4):481-487.  
QIN Siqing. The elastic resistance method for design of foundation pit supporting[J]. Journal of Engineering Geology, 2000,8(4):481-487.