

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.010

北京地铁车站深基坑主动土压力实测研究

李 涛, 关辰龙, 霍九坤, 刘显宽, 王 帅

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 土压力的大小与分布是深基坑支护结构设计的重要问题。基于北京地铁车站的土压力实测结果, 研究主动土压力随基坑开挖的变化规律, 进而分析主动土压力的分布模式与合力作用点的位置, 并与国内类似工程进行对比。研究表明: 基坑开挖过程中, 主动土压力先增加后不变, 在桩后近似呈梯形分布, 转折点位于桩顶下 14 m 处; 合力作用点位置几乎不随基坑开挖深度而发生变化; 实测主动土压力小于理论值, 其原因与理论计算方法、土体固结、围护结构刚度与变形以及施工因素有关。研究结果对认清桩后侧主动土压力变化规律有重要意义, 并可为类似工程提供参考。

关键词: 地铁车站; 深基坑; 主动土压力; 现场实测

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)02-0186-05

Field monitoring research on active earth pressure of deep foundation pit in Beijing subway station

LI Tao, GUAN Chenlong, HUO Jiukun, LIU Xiankuan, WANG Shuai

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The value and distribution of earth pressure are very important problem to retaining structure design in deep foundation pit. Based on the field monitoring results of earth pressure in Beijing subway station, the variation law of active earth pressure with foundation pit excavation is analyzed, and then the distribution pattern of active earth pressure and the position of action point of resultant force are studied. All these results are compared with the similar domestic engineering. The research results show that: during the excavation, active earth pressure increases firstly and then is stable, and the shape of distribution of active earth pressure is approximately trapezoid, the turning point is under the pile top and the distance is 14 meters. The position of action point of resultant force is hardly varied with the depth of excavation. The value of measured active earth pressure is less than the theoretical value, theoretical calculation method, soil consolidation, stiffness and deformation of retaining structure and construction factors are related to this. The results are of great importance to understand the active earth pressure variation, and can provide reference for similar projects.

Key words: subway station; deep foundation pit; active earth pressure; field monitoring

城市地铁车站多为明挖深基坑工程, 随着开挖深度越来越深, 施工环境也越来越恶劣, 使深基坑的安全稳定面临极大的风险。Terzaghi、Peck^[1]、Casagrande^[2] 和陈祖煜^[3] 等对支挡结构的计算分析等问题做过详细的研究。由于荷载水平、施工环境、地层特性等条件的影响, 使得理论计算值与实测值存在一定差别^[4-6], 这引起了国内外学者的重视。众

多研究人员从土拱效应、挡墙变形模式、桩土相互作用、桩(墙)变形等方面对支挡结构受力变形进行了理论分析^[7-10], 也有不少学者通过现场监测方法, 分析深基坑支护体系的受力变形规律^[11-14]。上述研究成果表明, 在深基坑工程的设计计算中, 土压力的大小与分布是一个重要而困难的问题。

本文以北京地铁 10 号线某车站深基坑工程为

收稿日期: 2015-09-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51508556); 北京高等学校青年英才计划资助项目(YETP0944); 国家自然科学基金重点资助项目(U1261212); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QL02)

作者简介: 李涛, 男, 副教授, 博士, 研究方向为城市地下工程。E-mail: litaocumtb@163.com

背景,通过现场监测,详细分析主动土压力的变化规律以及分布形式,并与类似工程实测结果进行对比,为今后深基坑设计与施工提供参考。

1 工程实例

本工程地铁车站为地下两层岛式车站,车站主体全长 275.3 m,有效站台宽度 12 m。车站盾构井深基坑工程采用明挖法施工,基坑平面呈近似正方形,尺寸为 21.0 m×18.0 m。基坑开挖的深度为 18.66 m。深基坑支护结构采用钻孔灌注桩加内支撑,桩长 21.5 m。该工程周边有地下管线及构筑物,施工难度大,对土体变形要求较高。

1.1 工程地质情况

本地铁车站施工影响的地层自上而下依次为:人工填土层,层厚 0.80 m~4.28 m;粉土②层,厚度为 0.74~2.13 m;粉细砂④₃层,厚度为 1.61~1.85 m;卵石圆砾⑤层,厚度为 10.95~15.33 m;粉质粘土⑥层,厚度为 2.70~3.70 m;卵石⑦层、细中砂⑦₁层,该层大部分钻孔未见底。各土层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土层基本物理力学参数

Tab. 1 Basic physical and mechanical parameters of soil layer

土层代号	土层名称	密度/(g/cm ³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	孔隙比	压缩模量 E/kPa
①	杂填土	1.60	8	0	0.33	
②	粉土	1.60	8	10	0.33	
④ ₃	粉细砂	2.02	30	0	0.28	(20)
⑤	卵石圆砾	2.10	45	0	0.23	(50)
⑥	粉质粘土	2.03	12	26	0.29	7.0
⑦	卵石	2.15	55	0	0.23	(80)
⑦ ₁	细中砂	2.08	40	0	0.25	(50)

注:括号中的数字为工程经验值。

1.2 水文地质情况

车站无地表水。地下水的主要分布:层间水,含水层为卵石⑦层,水位埋深为 29.5 m;潜水,水位标高 30.26~31.94 m。地下水主要接受大气降水补给,主要以蒸发及越流补给下层地下水的方式排泄。

1.3 车站基坑支护方案

综合考虑基坑位置及周边规划情况,支护结构采用钻孔灌注桩加内支撑,共设三道钢支撑,如图 1 所示。

第 1 道钢支撑设置在冠梁处,第 2、3 道钢支撑通过水平钢围檩支撑在钻孔灌注桩上。第 1、2 道钢

支撑间距为 9.1 m,第 2、3 道钢支撑间距为 5.3 m^[15]。随着基坑的开挖,桩间土防护采用挂网喷射混凝土支护,喷射 C20 混凝土,厚 80 mm,钢筋网片为 Φ6@150×150,钢筋网搭接一个网孔,并找平以确保防水层的施工。当桩间土渗水时,在护面设泄水孔,基坑安全等级为一级。

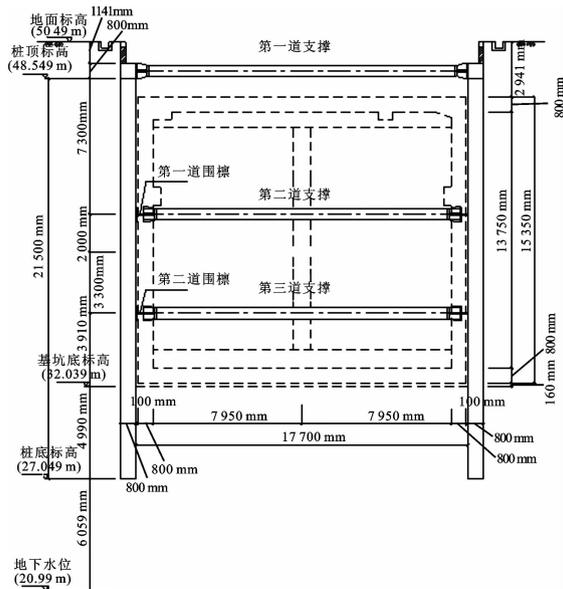


图 1 基坑支护断面图

Fig. 1 Cross-section of foundation pit

2 车站深基坑施工过程与土压力监测方案

2.1 深基坑施工过程

基坑土方开挖遵循“横向分条、纵向分段,竖向分层,从上至下”的施工原则。桩间喷射混凝土、钢支撑安装与土方开挖密切配合,即纵向按每开挖 3 m 左右进行桩间混凝土施工,竖向按照钢支撑竖向间距进行分层。土方开挖与桩间挂网喷混凝土、钢支撑施工密切配合。基坑开挖过程中,机械开挖至设计基底标高以上 30 cm 后改用人工开挖。具体步骤为:①施作钻孔灌注桩,开挖浅基坑,施作冠梁,待围护桩及冠梁达到强度后,开挖基坑至第一道钢支撑下 0.5 m,安装第一道钢支撑;②继续开挖,并及时进行桩间喷射混凝土施工;③开挖基坑至第二道钢支撑下 0.5 m,安装第二道钢支撑;④开挖基坑至第三道钢支撑下 0.5 m,安装第三道钢支撑;⑤开挖基坑至设计深度,施作垫层、防水层、底板及底纵梁。

钢支撑的架设是保证基坑开挖和主体结构施工安全、控制基坑收敛和位移的有效措施。第一层钢支撑架设于冠梁预埋钢板上,第二、三层钢支撑通过两根 140b 型钢构成的钢围檩架设在钻孔灌注桩上,钢围檩由支撑托架和胀管螺栓支承。钢支撑安装时

预加 50% 的支撑设计轴力。钢围檩、支撑托架各构件的连接采用焊接,支撑钢管的连接采用高强螺栓。

基坑开挖后,沿桩全高范围内,桩体的水平位移全部偏向基坑内部,根据主动土压力的定义,所测土压力为主动土压力。

2.2 主动土压力现场监测方案

本工程的监测内容有:桩体水平位移、钢支撑轴力、桩体主筋内力、主动土压力。其中桩后主动土压力监测方案为:主筋外安装土压力计,大约每隔 3 m 左右安装一个土压力计,一根桩共安装 8 个土压力计,以监测基坑长边中点外侧土体横向压力的变化值。土压力计量程为 0~0.5 MPa,综合误差小于 1%F.S,满足要求。如图 2 所示。

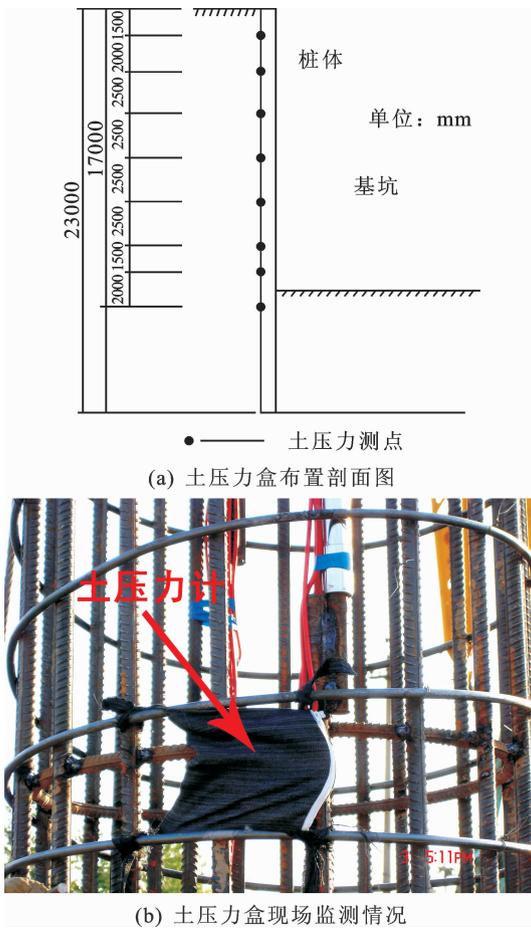


图 2 现场监测土压力盒布置图

Fig. 2 Layout of earth pressure cell in field monitoring

土压力计近似均匀分布于桩顶至桩尾,因桩采用钻孔灌注的方式,故将土压力计固定在主筋上,并注意区分迎土侧和基坑侧,所得测试结果是合理的。土压力计按如下方法埋设:①检验并记录土压力计初始读数;②将土压力计装入事先准备好的布袋子中;③将装有土压力计的布袋子绑在钢筋笼主筋的相应位置上,并注意区分基坑侧和迎土侧。

3 理论计算与实测结果分析

3.1 理论计算方法

因无地下水影响,依据《建筑基坑支护技术规程》^[16],作用在支护结构上的主动土压力可用下列公式进行计算:

$$p_{ak} = \sigma_{ak} K_{a,i} - 2c_i \sqrt{K_{a,i}} \quad (1)$$

$$K_{a,i} = \tan^2(45 - \frac{\varphi_i}{2}) \quad (2)$$

式中: p_{ak} 为支护结构外侧第 i 层土中主动土压力强度标准值(kPa),当 $p_{ak} < 0$ 时,应取 $p_{ak} = 0$; σ_{ak} 为支护结构外侧计算点土中竖向应力标准值(kPa); $K_{a,i}$ 为第 i 层主动土压力系数; c_i 为第 i 层土黏聚力(kPa); φ_i 为第 i 层土内摩擦角($^\circ$)。

3.2 计算与监测结果对比分析

图 3 为现场实测土压力随时间的变化曲线图。从图 3 可以看出:①桩侧土压力具有层状分布特性,但实测土压力的数值并没有随测点深度的增加而增加。桩顶下 3.5 m 处的最大土压力稳定在 10~12 kPa 之间,而桩顶下 6.0 m 处的土压力实测值变化不大,最终在 2~3 kPa 之间稳定;②随着基坑的开挖施工,土压力都是从一个低值缓慢增加到一个稳定值,曲线上呈现的波动现象多与施工的开展有关;③桩顶下 6.0 m 的土压力变化不大,其主要原因是桩顶下 6~8 m 的范围内出现了桩体的最大水平位移^[3],导致土体强度下降,从主动极限土压力分析,由于土体的流变特性,出现应力松弛,由此可见,桩侧土压力的大小与土体位移关系较大。

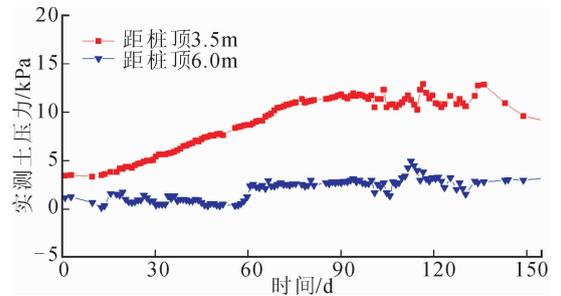


图 3 土压力随时间的变化值

Fig. 3 The value of earth pressure in different time

进一步分析不同开挖阶段的实测土压力值与计算值,如图 4 所示。

从图 4(a)、(b)可以看出:①实测土压力值小于计算值,深度越深,实测值比计算值小得越多。在基坑开挖面以上,实测土压力值随深度的增加而增加,大体呈线性变化;基坑开挖面以下,实测土压力有减

小的趋势,这与文献[4]和[6]的土压力分布形式大体一致。②随着基坑的开挖,在桩顶下1~4 m的范围内,实测土压力值变化较大。桩顶下3.5 m的实测初始值为3.0 kPa,第3道钢支撑施工完毕后达到最大值,为12.0 kPa,比初始值增加4倍;桩顶下6~14 m范围内土压力线性增加,且变化不大;在开挖面以下的实测土压力值随基坑开挖而逐渐减小,可能是由于土压力由静止土压力向主动土压力转变的结果。③基坑开挖完成后,实测土压力值较上一工况略有降低,说明随着桩体水平位移的增加,土体强度下降,主动区土压力减小,进而表明深基坑实际土压力应是桩体水平位移、时间、土体强度指标的函数。④不同工况下,实测土压力值的合力作用点几乎不随基坑开挖深度的增加而发生变化,基本都出现在-10.2 m的位置,而理论计算值的合力作用点在-11.8 m的位置。实测值和理论值的分布形式在基坑开挖面以上都随深度的增加而增加;在基坑开挖面以下,实测值逐渐减小,理论值逐渐增大。

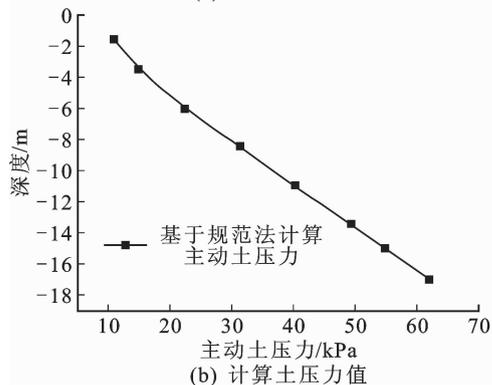
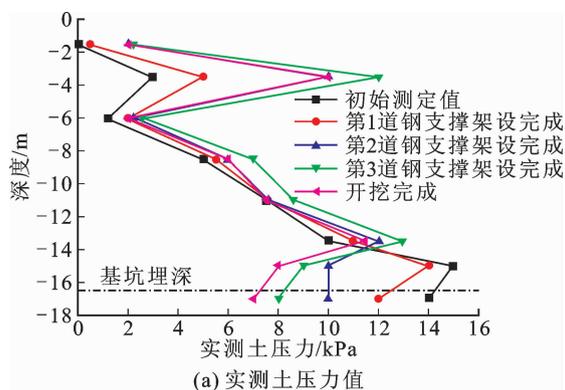


图4 不同开挖深度下的土压力值

Fig. 4 Earth pressure in different excavation depth

上述研究结果表明,深基坑支护结构所受的土压力其实测值和理论计算值无论是力的大小,还是分布形式都存在较大差别,这可能与桩土相互作用、桩体水平位移、土体流变性、时间、土体强度等因素有关。

4 地铁车站深基坑主动土压力研究

4.1 主动土压力系数计算与分析

工程中实测的土压力的分布形式与规范法计算的结果不完全相同。实测值与规范法计算值在基坑开挖面以上都随深度的增加而增加,但在基坑开挖面以下,规范法计算值是随深度的增加逐渐增加,而实测值则有逐渐减小的趋势,同文献[4]和[6]的研究结果相似。实测结果表明,主动土压力系数不仅与土体内摩擦角有关,而且是地层埋深的函数。在本工程坑底以上,土的内摩擦角的加权平均值为 35.4° ,按规范方法计算的整体主动土压力系数 $K_a = 0.2664$ 。由工程现场实测值反算的主动土压力系数在不同埋深处有不同值:桩顶下1~4 m, $K_{a,1}$ 为0.1176,约为理论值的0.5倍;桩顶下6~14 m, $K_{a,2}$ 为0.0533,约为理论值的0.2倍;桩顶下14 m以下, $K_{a,3}$ 值随深度的增加而迅速减小。文献[4]研究结果认为理论土压力系数大约是实测值的11倍。

4.2 主动土压力分布形式研究

目前,深基坑支护结构设计计算时,多采用式(1)、(2)进行,其计算结果表明,主动土压力的分布形式为三角形分布或梯形分布,且相同性质土层均为线性增加。图4(a)的实测结果表明,土压力分布大体分为三部分:第一部分为桩顶下6 m范围内,土压力先增大后减小;第二部分为桩顶下6 m~14 m,土压力线性增加;第三部分为桩顶下14 m至桩底,土压力基本保持不变。第一部分土体土压力分布变化规律性不强,与理论计算值出入较大,其主要原因是工程施工致使桩顶周围土体产生扰动,土体中产生了裂隙,破坏了土体固有特性。第二部分土体土压力分布与理论计算数值相仿。故,从本次实测结果来看,从桩顶开始至-14 m主动土压力为三角形或梯形分布,而-14 m以下为矩形分布。该深基坑主动土压力分布如图5所示。

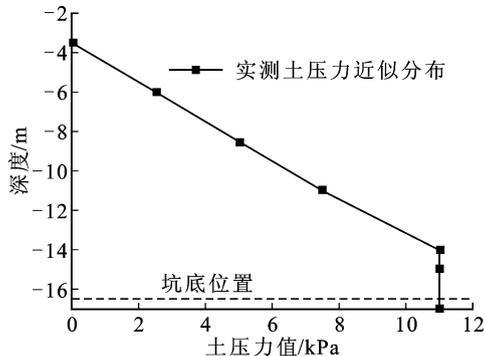


图5 实测土压力近似分布值

Fig. 5 Approximate value of field monitoring earth pressure

从图5可以看出,土压力随着埋深的增加按照线性分布逐渐增加,到基坑底上2 m左右时,土体压力不再随深度的增加而发生变化。

4.3 主动土压力大小研究

理论计算土压力值与实测值的比值随深度的变化规律如图6所示。其拟合方程为:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (3)$$

式中: y 为理论计算值与实测值的比值; x 为埋深(m),数值取负值; a 、 b 、 c 均为拟合参数。

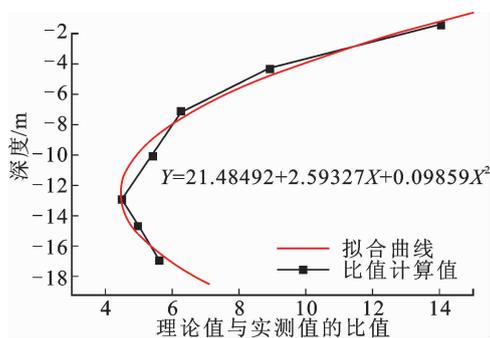


图6 理论计算值与实测值比值随深度变化规律
Fig. 6 Ratios of theoretical calculated values and measured values in different depth

由图6可以看出:随着深度的增加,该比值先减小后增大,也表明实测值与理论值之间的差别除与土体基本性质有关外,还与土体的埋置深度有关。出现上述结果的原因可能是:理论计算基于极限平衡法,未考虑支护结构的变形,可能会影响土体应力的重分布;深基坑开挖深度范围内无地下水,桩体施工过程中对桩后侧土体产生扰动,然而由于土体具有较好的“自稳”能力,使桩后土压力降低;其次,土体经历长时间固结,内部结构稳定,含水量小,使得土体具有了较高的抗拉强度;第三,围护结构(围护形式和围护刚度)用于抵抗基坑的变形和移动,不同的围护结构必然引起土压力的差异;最后在施工时,不同的施工顺序和开挖进度的快慢也都会对土压力造成影响。因此,在计算深基坑支护结构的主动土压力时,应对理论土压力的适用范围做进一步的研究。

5 结论

工程现场实测和理论计算分析表明,实测土压力值小于理论计算值,实测土压力的合力作用点位置不随基坑开挖深度的增加而发生变化。土压力实测值和理论值在基坑开挖面以上都随深度的增加而增加;在基坑开挖面以下,实测值基本不变,理论值逐渐增大。

现场实测土压力很好的反映了支护结构所受土压力的变化规律,对深基坑施工过程的安全控制起到了很好的理论支撑作用。然而,主动土压力受施工扰动、前期固结压力、土体干密度、桩土相互作用等因素的影响,使实测值与理论值存在差别。因此,理论土压力计算值的适用范围以及可能对支护桩内力产生的影响值得深入研究。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [2] CASAGRANDE L. Comments on conventional design of retaining structures [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1973, 99(2): 181-198.
- [3] 陈祖煜,迟鸣,孙平,等. 计算柔性支挡结构主动土压力的简化方法 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 22-27.
CHEN Zuyu, CHI Ming, SUN Ping, et al. Simplified method of calculating active earth pressure for flexible retaining walls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 22-27.
- [4] 夏永承,董道洋,胡敏云,等. 深基坑护壁桩的受力特性和土压力 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 222-226.
XIA Yongcheng, DONG Daoyang, HU Minyun, et al. Behavior and earth pressure of the retaining piles with anchors for deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 222-226.
- [5] 李涛,周志龙,刘波,等. 盾构井深基坑围护结构变形规律及信息化施工研究 [J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(3): 361-366.
LI Tao, ZHOU Zhilong, LIU Bo, et al. Research on displacements law of shield shaft enclosure structure and the informatization construction analysis [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(3): 361-366.
- [6] 蒋忠信,蒋良潍. 南昆铁路支挡结构主动土压力分布图式 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1035-1040.
JIANG Zhongxin, JIANG Liangwei. Distribution map forms of active earth pressure on retaining structures in nanning-kunming railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1035-1040.
- [7] 彭明祥. 挡土墙主动土压力的库仑统一解 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 379-386.
PENG Mingxiang. Coulumb's unified solution of active earth pressure on retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 379-386.

- [13] 郭齐胜,钱涵欣,彭国义,等. 水轮机引水部件的水力损失模型[J]. 水利学报,1996,(10):56-60.
GUO Qisheng, QIAN Hanxin, PENG Guoyi, et al. A hydraulic losses model of the diversion components of hydraulic turbines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (10): 56-60.
- [14] 曾云,张立翔,郭亚昆,等. 共用管段的水力解耦及非线性水轮机模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(14):103-108.
ZENG Yun, ZHANG Lixiang, GUO Yakun, et al. Hydraulic decoupling and nonlinear hydro turbine model with sharing common conduit[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 103-108.
- [15] 王文全,闫妍,张立翔. 混流式水轮机跨尺度流道内复杂湍流的数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2012,32(23):132-138.
WANG Wenquan, YAN Yan, ZHANG Lixiang. Numerical simulation of complex turbulence in an across scale flowing passage of Francis turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(23): 132-138.
- (责任编辑 王卫勋)
-
- (上接第 190 页)
- [8] 彭述权,刘爱华,樊玲. 不同位移模式刚性挡墙主动土压力研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(1):32-35.
PENG Shuquan, LIU Aihua, FAN Ling. Active earth pressure for rigid retaining walls with different displacement modes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 32-35.
- [9] 邓子胜,邹银生,王贻荪. 考虑位移非线性影响的深基坑土压力计算模型研究[J]. 工程力学,2004,21(1):107-111.
DENG Zisheng, ZOU Yinsheng, WANG Yisun. Calculation of the earth pressure considering nonlinear displacement influence on deep excavation [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 107-111.
- [10] 朱建明,赵琦. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力与被动土压力统一解 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (9): 2501-2506.
ZHU Jianming, ZHAO Qi. Unified solution to active earth pressure and passive earth pressure on retaining wall considering soil arching effects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2501-2506.
- [11] 李涛,周妍,宋常军,等. 北京地铁 6 号线一深基坑监测与分析[J]. 市政技术,2011,29(5):117-120.
LI Tao, ZHOU Yan, SONG Changjun, et al. Monitoring and analysis of a deep foundation pit of Beijing Metro Line 6 [J]. Municipal Engineering Technology, 2011, 29(5): 117-120.
- [12] 陈国强. 北京第五广场基坑支护设计与监测[J]. 岩土工程学报,2008,30(增刊):612-618.
CHEN Guoqiang. Design and monitoring of supporting for Beijing No. 5 Square foundation pit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (S): 612-618.
- [13] 马昕,周予启. 北京国贸三期 A 阶段基坑支护设计与施工监测[J]. 施工技术,2011,40(355):26-29.
MA Xin, ZHOU Yuqi. Design and construction monitoring of foundation excavation supporting in a stage of Beijing World Trade Center three phase [J]. Construction Technology, 2011, 40(355): 26-29.
- [14] 高华东,霍达,陶连金. 北京光彩大厦深基坑开挖现场监测与理论分析[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(3):423-427.
GAO Huadong, HUO Da, TAO Lianjin. Field measurements and theoretical analysis in deep excavation around Beijing Brilliance Edifice [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 (3): 423-427.
- [15] 李涛,王昕鹏,陈慧娴,等. 钢支撑对盾构竖井深基坑围护桩体变形规律的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(2):74-77.
LI Tao, WANG Xinpeng, CHEN Huixian, et al. Influence of steel supporting on deformation of deep pit pile structures in shield well [J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2015, 36(2): 74-77.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ120-2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
(责任编辑 周 蓓)