

锚杆参数对深基坑变形影响的有限元分析

李兵¹, 刘阳¹, 李卓伦¹, 刘娜²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 丹东市商业建筑设计院有限公司, 辽宁 沈阳 118000)

摘要 目的 研究深基坑锚杆支护结构中锚杆不同参数对深基坑变形的影响, 为锚杆支护结构优化设计提供参考. 方法 基于沈阳地铁北大营街站附属基坑工程, 利用岩土有限元软件 Midas GTS NX 建立基本模型和对比模型, 分析施工过程中锚杆锚固长度、锚杆倾角、预应力大小等参数在不同取值范围下基坑的变形情况. 结果 锚杆锚固长度增加时, 基坑变形随之减小, 但锚杆对基坑变形的限制效果的增幅随之减小; 锚杆倾角增加时, 预应力锚杆的作用效果呈先增加后减小的趋势, 当锚杆倾角超过 20° 时, 锚杆支护的作用效果急剧减弱; 锚杆轴力增加时, 基坑变形的减少和预应力的增加接近线性关系, 在轴力增量超过 200 kN 之后, 轴力增加不能对基坑变形产生明显的变化. 结论 在沈阳地区地质条件下, 预应力锚杆锚固长度建议取 8~12 m, 锚杆倾角取 10°~20°, 预应力取 150~200 kN.

关键词 深基坑; 数值模拟; 锚杆参数; 有限元

中图分类号 TV551.4⁺2 文献标志码 A

Finite Element Analysis of Influence of Bolt Parameters on Deformation of Deep Foundation Pit

LI Bing¹, LIU Yang¹, LI Zhuolun¹, LIU Na²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Dandong Commercial Building Design Institute Co. Ltd., Dandong, China, 118000)

Abstract: The influence of different bolt parameters on the deformation of deep foundation pit is studied in order to provide reference for the optimal design of bolt support structure. Based on the foundation pit project attached to the Beidaying Street Station of the Shenyang Metro, the basic model and comparative model were established using the finite element software Midas GTS NX, and the parameters such as the anchor length, the inclination of the anchor, and the magnitude of the prestress were analyzed during construction deformation of the foundation pit in the range of values. As the anchorage length of the anchor rod increases, the deformation of the foundation pit decreases, but the increase in the effect of the anchor rod on the deformation of the foundation pit decreases.

收稿日期: 2019-10-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738007); 辽宁省科技厅重点研发计划项目(2019JH8/10100099); 沈阳市科技局项目(Z3318003)

作者简介: 李兵(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事城市地下轨道交通工程方面研究.

When the inclination of the anchor increases, the effect of the prestressed bolt increases first and then decreases, when the inclination of the anchor exceeds 20 degrees, the effect of the anchor support weakens sharply; when the axial force of the anchor rod increases, the reduction of the foundation pit deformation and the increase of the prestress approach a linear relationship. After more than 200 kN, the increase of axial force cannot cause obvious changes in the deformation of the foundation pit. Under the geological conditions in Shenyang, the ideal and reasonable parameter selection range for prestressed anchors: the anchor bolt length ranges from 8 m to 12 m, the anchor inclination angle ranges from 10 degrees to 20 degrees, and the prestressing force ranges from 150 kN to 200 kN.

Key words: deep foundation pit; numerical simulation; anchor parameter; finite element

近年来,我国城市地铁飞速发展,与之相伴的是深基坑工程的数目与规模日益增加^[1-4]. 锚杆最早是在煤矿开采中用来加固岩体的一种构件,随着锚固理论的不发展和完善以及预应力锚杆支护技术的不断改进和提高,预应力锚杆已经开始广泛应用于各类工程中,锚杆支护也因其特有的优势和良好的支护效果,在深基坑工程中得到广泛应用^[5-10].

由于深基坑工程具有临时性、复杂性、随机性和地域性等特点,任何环节的失误都会带来事故,是一项高风险性工程^[11-15],在工程中锚杆支护结构方案里的锚杆锚固长度、锚杆倾角、锚杆预应力等参数设计就显得尤为重要. 笔者结合沈阳地铁北大营街站地铁附属基坑工程,利用 Midas GTS 岩土有限元模拟软件建立基坑开挖有限元模型,分析预应力锚杆各参数变化对支护效果和基坑变形的影响,在保证安全经济的前提下,探究基坑支护设计时预应力锚杆参数的理想取值范围,为同类工程设计提供参考依据.

1 工程概况

1.1 工程地质

沈阳地区属于平原地区,平均海拔约 50 m,地势由东向西缓慢倾斜^[16]. 工程所在场地地层主要由黏性土、砂类土及碎石类土组成. 通过勘察报告,可知基坑开挖下的土层性质有:杂填土层底标高 42.30 ~ 46.62 m,土层厚 1.90 ~ 6.00 m;杂填土层下方是中粗

砂,土层厚 0.80 ~ 4.80 m;中粗砂下方是砾砂,土层厚 2.00 ~ 12.00 m;砾砂下方是圆砾,土层厚 2.00 ~ 12.20 m;部分区域土层中含有泥砾,层厚 7.90 ~ 20.90 m;部分土层中含有混合花岗片,土层厚 2.00 ~ 7.20 m,层底标高 -4.80 ~ -2.30 m.

1.2 支护方案

附属结构基坑宽 50 m,为南北走向,长 120 m,与北海街同方向. 基坑面积 5 500 m²;深度 11.5 m,属于一级自身风险工程. 支护结构采用围护桩 + 锚索的支护体系,附属基坑底板埋深 11.5 m,采用明挖法施工,经计算验证,采用 $\Phi 800 @ 1 200$ 的钻孔灌注桩可以满足维护要求,附属基坑西侧和南侧在围护边桩上沿基坑竖向设置三道锚索,基坑东侧一层部分设置三道锚索,预应力锚杆支护如图 1 所示,采用坑外降水.

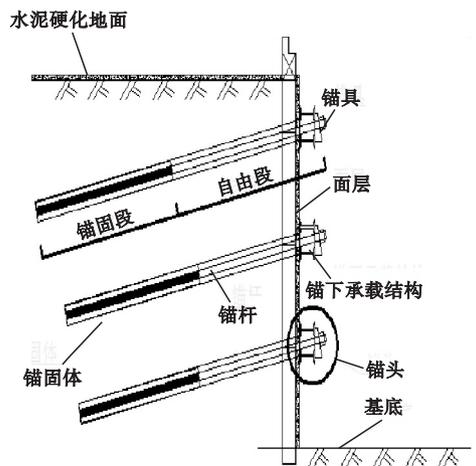


图 1 预应力锚杆支护示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prestressed bolt support

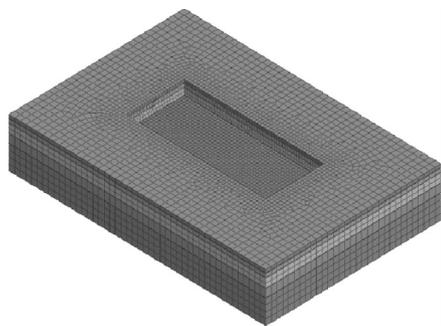
2 有限元模拟

2.1 建立模型

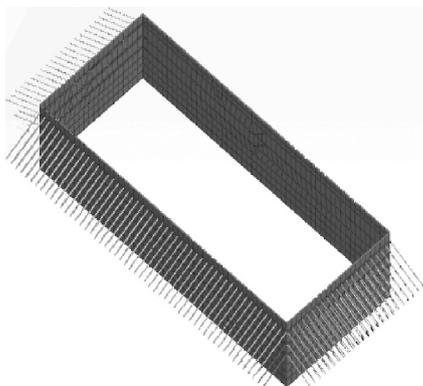
附属基坑的三维有限元模型用三维岩土分析和隧道有限元软件 Midas GTS NX 进行建模分析,使用 Mohr-Coulomb 本构模型. 附属基坑沿东西方向长约 120 m,宽约 50 m,最大开挖深度约 18 m. 遵循圣维南原理并结合之前的施工经验可以知道,由于基坑开挖所引起的扰动范围可能是基坑开挖深度的 3 ~ 4 倍,影响深度大概是其开挖深度的 2 ~ 4 倍^[17],取基坑附近一定区域进行研究,故有限元模型取 240 m × 180 m × 50 m 的立方体,模型共生成节点 32 411 个,有限元单元 45 848 个,整体模型如图 2(a) 所示. 基坑三维整体有限元计算,考虑了基坑结构的整体空间效应,采用三维有限元计算平台进行支护构件、内支撑、立柱、斜撑、锚杆及土岩体的三维空间整体协同计算,使材料的抗力性能

得到充分,从而使计算结果更加经济、合理^[18].

基坑围护结构模型见图 2(b). 附属基坑长度 × 宽度 × 深度为 120 m × 50 m × 11.5 m. 围护桩是 Φ800@1 200 的钻孔灌注桩,沿基坑四周均匀布设,经计算可将 Φ800@1 200 的钻孔灌注桩等效成厚度 0.60 m 的地下连续墙,在软件中用矩形板单元模拟. 冠梁使用混凝土浇成,宽度 800 mm、高度 600 mm. 挡土墙宽度 250 mm、高度 500 mm. 附属基坑布置有三道锚杆支撑,水平间距 2.4 m,垂直间距从上至下分别为 3.3 m、3.0 m,选用直径 15.20 mm 的 7Φ5 钢绞线,钢筋截面积 140.00 mm²,理论重量 1.19 kg/m,筋壁摩擦系数 0.12,泊松比取 0.3,弹性模量 194 GPa. 根据附属基坑的地质条件,将土体划分为五层,各层土体相关参数见表 1,其他附属基坑围护结构参数见表 2.



(a) 整体模型



(b) 围护结构

图 2 整体模型和围护结构示意图

Fig. 2 Overall model and envelope schematic diagram

表 1 主要土层参数

Table 1 Main parameters of soil layer

土层名称	层厚/m	重力密度/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
杂填土	2.5	16.0	0.40	10	11.4	3.5
砂砾	4.0	19.5	0.35	20	35.0	22.0
圆砾	7.0	19.5	0.25	0	35.0	26.2
圆砾	7.0	21.0	0.25	0	37.0	30.0
砾砂	19.5	20.8	0.28	30	37.0	29.0

表2 围护结构设计参数

Table 2 Design parameters of enclosure structure

构件	重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/GPa
钻孔灌注桩	20	0.17	30
混凝土支撑与冠梁	25.5	0.20	32
钢围檩	78	0.30	200

预应力锚杆支护主要考虑轴向应力的影响,不考虑压力,所以在模拟中使用植入式桁架来模拟,截面为实心圆形,倾角为 15° ,锚头处在比开挖底面高0.5 m处.第一道锚杆自由段长度7 m,锚固段长度10 m,总长度17 m,轴向预应力150 kN;中间一道锚杆自由段长度5 m,锚固段长度8 m,总长度13 m,轴向预应力170 kN;最下边一道锚杆自由段长度5 m,锚固段长度7 m,总长度12 m,轴向预应力170 kN.基于以上参数条件,建立长宽高为 $240\text{ m}\times 180\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的有限元模型.

2.2 模拟结果分析

经过对施工过程的模拟,模型每一阶段的变形特征和变化量都能够比较直观地展现在模型的云图当中,模拟至基坑开挖最后阶段时基坑变形情况如图3、图4所示.

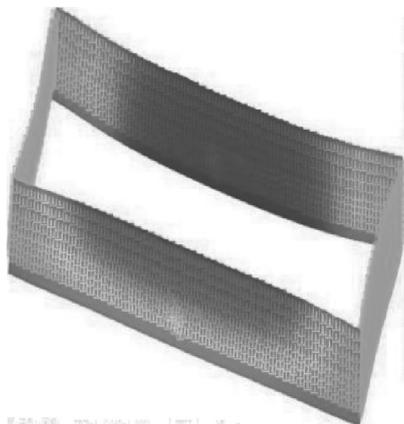


图3 基坑内壁变形示意图

Fig. 3 The schematic diagram of deformation of inner wall of foundation pit

模拟至开挖结束时,基坑变形云图展示了与实际情况吻合的变形特征.从图3水平方向变形云图中可以看出,基坑垂直坑壁方

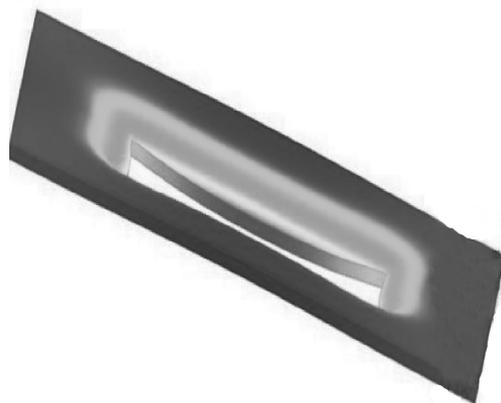


图4 地表变形云图

Fig. 4 The surface deformation contour plot

向变形明显,南侧变形最大,云图颜色由基坑长边最高处的中间位置向下部和两边由深色渐变浅,呈半个鸭蛋的形状分布,可见变形最大处位于基坑顶部中心区域,向外围扩散时变形逐渐减小.北侧基坑壁紧邻地铁十号线主体,云图颜色极浅,结构稳定,变形极小且分布均匀.从图4基坑东侧垂直方向变形云图可以看出,最内侧浅色区域变形量最大且为向下沉降,在最内侧浅色区域以外,越远离基坑云图颜色越浅,沉降变形越小.

3 基于不同锚杆参数的模拟分析

3.1 锚固段长度的影响

分别建立基本模型和对比模型,比较不同锚固长度下基坑变形的差异.基本模型布设三排预应力锚杆,第一排自由段长度7 m,锚固端长度10 m,总长度17 m;第二排自由段长度5 m,锚固段长度8 m,总长度13 m;第三排自由段长度5 m,锚固段长度7 m,总长度12 m.改变锚固段长度得出不同长度下基坑水平位移和地表沉降最大变化量,结果见表3.

基本模型中的基坑最大水平位移为2.90 mm,最大地表沉降为5.96 mm,将基本模型锚固段长度延长5 m得到对比模型1,延长10 m得到对比模型2.分别对比两组模型情况,基坑的变形会伴随着锚杆锚固段长

表3 不同锚固长度下的变形最大值

Table 3 The maximum deformation under different anchoring lengths

组别	锚杆	总长度/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	地表沉降最大值/mm	水平位移最大值/mm
基本模型	第一道	17	7	10		
	第二道	13	5	8	5.96	2.90
	第三道	12	5	7		
对比模型1	第一道	22	7	15		
	第二道	18	5	13	5.32	2.63
	第三道	17	5	12		
对比模型2	第一道	27	7	20		
	第二道	23	5	18	5.12	2.58
	第三道	22	5	17		

度的延伸而受到抑制,水平位移受抑制效果比较突出,延长5 m时水平位移减小了9.3%,沉降减小了10.7%,延长10 m时的水平位移又减小了1.7%,沉降又减小了3.8%。由此可见,随着锚固段长度的延伸,锚杆对基坑变形的限制增幅会随之而减小,为合理发挥锚固段长度对支护效果的提高作

用,本工程锚杆的锚固段长度建议控制在8~15 m,经济效益最为合理,同时安全性也可以得到保证。

3.2 锚杆倾角的影响

分别建立倾角为5°、10°、15°、25°、30°时的有限元模型。各角度下模型水平位移云图如图5所示。

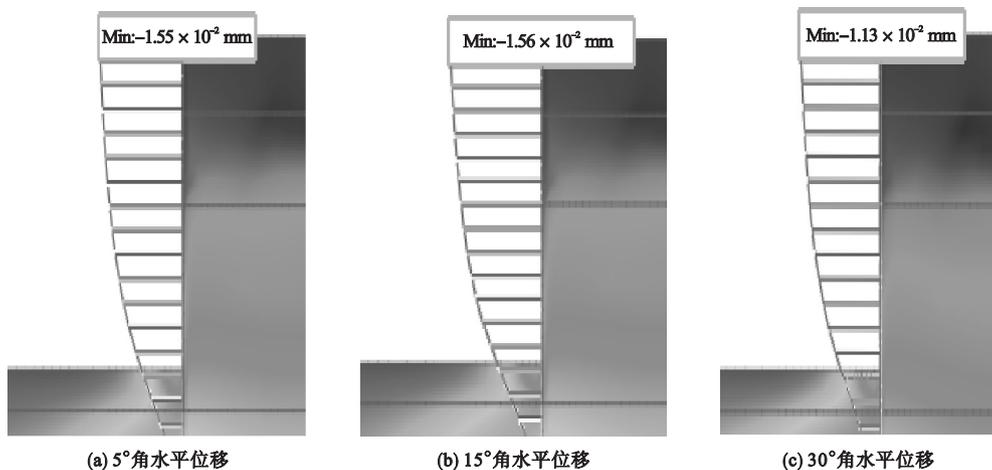


图5 水平位移云图

Fig. 5 The horizontal displacement contour plot

模拟得出不同情况下基坑最大水平位移随倾角变化曲线(见图6)。从图中可以看出,在倾角为15°时最大水平位移最小。根据模拟得到最大轴力随锚杆倾角变化曲线如图7所示。从图中可以看出,预应力锚杆倾角从5°向15°增加时,基坑侧壁水平位移最大值

逐渐减小;倾角从10°增加到15°时,对位移限制的作用变化最明显。倾角从15°增加到30°时,水平位移最大值又逐渐增加,20°之前增加的效果相对平缓,20°之后锚杆对基坑水平位移的限制作用下降比较明显。

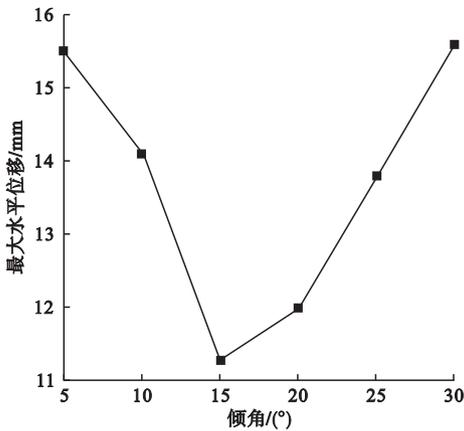


图6 最大水平位移随锚杆倾角的变化曲线

Fig.6 The curve of maximum horizontal displacement with the angle of rock bolt

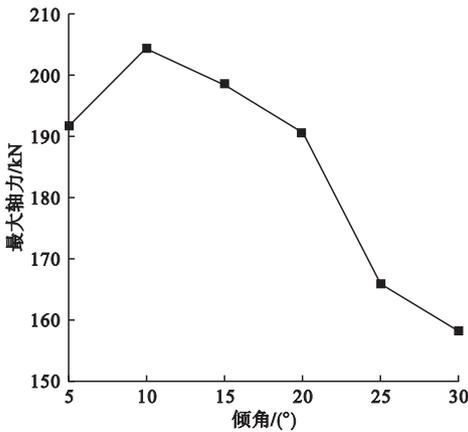


图7 最大轴力随锚杆倾角的变化曲线

Fig.7 The variation curve of the maximum axial force with the angle of rock bolt

预应力锚杆倾角为 5° 时,最大轴力为191.67 kN;倾角为 10° 时,最大轴力为204.38 kN;倾角为 15° 时,最大轴力为198.49 kN;倾角为 20° 时,最大轴力为190.43 kN;倾角为 25° 时,最大轴力为165.63 kN;倾角为 30° 时,最大轴力为158.20 kN.随着倾角的增大,预应力锚杆的轴向力先略微增大,之后呈现逐渐减小的趋势,倾角超过 20° 的时候轴力减小幅度突然明显, 25° 之后继续减少.分析原因为预应力锚杆主要是通过锚杆张拉产生的拉力限制土体的水平位移,延杆件方向预应力相等的情

况下,锚杆的水平倾角越大,锚杆在水平方向上提供的分力也就越小,实际发挥的作用也就越小,产生了过多无效的力,造成了材料的浪费^[19].而且过大的倾角导致锚杆在竖直方向上存在更大的分力,可能对支护结构以及下部土体造成不利影响,如果倾角过大,打入深度较深,也存在破坏临近建筑物地基基础的可能.本基坑距坑顶6.1 m以上的部分稳定土体相对下方土体内摩擦角小,抗剪强度略低,同等参数的锚杆在该土体中锚固段的黏聚力要小于下方土体,对土体的限制作用也就更差,当锚入角度小于 10° 时,预应力锚杆的锚固段会有相当一部分长度锚固在土质较不稳定的土层中,导致最上层锚杆预应力严重损失,对土体位移的抵抗能力明显下降,只能发挥极其微小的作用^[20].

综合上述分析,随着锚杆角度的增加,预应力锚杆的作用效果呈现先增加后减小的趋势,当锚杆倾角超过 20° 时,锚杆支护的作用效果急剧减弱,所以从基坑变形的安全性、锚杆材料利用率和减少预应力损失的角度考虑,锚杆倾角建议取 $10^\circ \sim 20^\circ$.

3.3 预应力的影响

基于本基坑工程建立8组模型,每组模型各道锚杆预应力较上一组增大50 kN,得到不同情况下基坑最大水平位移和最大地表沉降值,结果见表4.

初始三道锚杆支撑的预应力大小从上向下依次为0 kN、20 kN、20 kN.起始最大水平位移为23.3 mm,第一次加力最大水平位移减小了3.1 mm;第二次加力位移减小2.7 mm;第三次加力位移减小1.6 mm;第四次加力位移减小0.9 mm;第五次加力位移减小0.3 mm.初始沉降量为13.71 mm,每次加大预应力,沉降量分别缩小了2.35 mm、1.57 mm、1.34 mm、0.52 mm、0.45 mm、0.25 mm和0.06 mm.最大水平位移和最大地表沉降随轴力变化曲线如图8、图9所示.

表4 预应力对水平位移影响

Table 4 Influence of prestressed size on horizontal displacement

序号	第一道锚杆 预应力/kN	第二道锚杆 预应力/kN	第三道锚杆 预应力/kN	水平位移 最大值/mm	地表沉降 最大值/mm
1	0	20	20	23.3	13.71
2	50	70	70	20.2	11.36
3	100	120	120	17.5	9.79
4	150	170	170	15.9	8.45
5	200	220	220	15.0	7.93
6	250	270	270	14.7	7.48
7	300	320	320	14.7	7.23
8	350	370	370	14.6	7.17

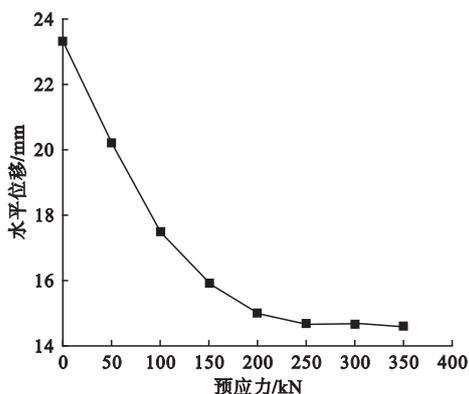


图8 预应力与水平位移关系曲线

Fig. 8 The curve of the relationship between prestress and horizontal displacement

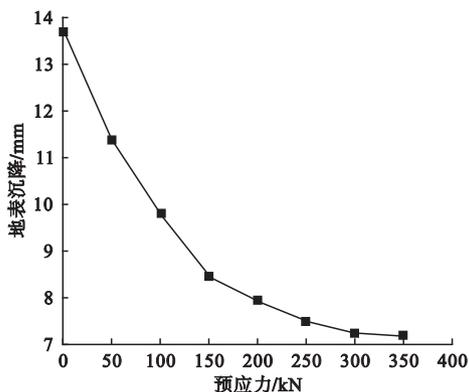


图9 预应力与地表沉降关系曲线

Fig. 9 The curve of the relationship between the prestress and the ground settlement

分析可知,随着预应力值增大,基坑水平位移分别减小了 13.3%、11.6%、9.1%、5.7%、2%、0%;地表沉降分别减小了

17.1%、13.8%、13.7%、6.6%、5.6%、3.3%。在轴力增量小于 100 kN 时,水平位移最大值和地表沉降最大值的减少和预应力的增加均接近线性关系,预应力的增加可以明显减少基坑的最大位移。在轴力增量超过 200 kN 之后,轴力增加不能对基坑变形产生明显的变化,轴力越大基坑变形的减小幅度越小。

4 结 论

(1) 锚杆锚固段长度越长,锚杆支护性能越好。随着锚固段长度的增加,锚杆支护性能提升的幅度逐渐减缓,考虑到经济效益和现场实际情况,锚固段长度建议取 8~12 m。

(2) 锚杆支护效果随水平倾角的增加而减小,锚固角过小会导致锚杆难以锚固到稳定土层中,影响锚固质量,理想锚固角度为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

(3) 预应力的增长能有效改善锚杆支护性能,预应力对支护效果的改善效率随着预应力的提升而逐渐降低,预应力控制在 150~200 kN 时可以最大限度发挥预应力对基坑变形的限制效果。

参考文献

- [1] 魏燃. 地铁车站深基坑开挖围护结构变形监测数据分析与数值模拟[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.

- (WEI Ran. Study on the deformation law of retaining structure with monitoring data and numerical simulation [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.)
- [2] 张方. 邻近既有地铁的深基坑施工安全风险评估与预测研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
(ZHANG Fang. Risk assessment and prediction study of deep pit foundation that adjacent to existing subway [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.)
- [3] XU P, HAN Y W, DUAN H H, FANGS T. Environmental effects induced by deep subway foundation pit excavation in yellow river alluvial landforms [J]. Geotechnical and geological engineering, 2015, 33 (6): 1587-1594.
- [4] WANG Z C, GUO X P, WANG C. Field monitoring analysis of construction process of deep foundation pit at subway station [J]. Geotechnical and geological engineering, 2019, 37 (2): 549-559
- [5] 苏天涛. 深基坑桩锚支护结构变形及稳定性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
(SU Tiantao. Study on deformation and stability of pile-anchor support structure in deep foundation pit [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.)
- [6] 王辉. 预应力锚杆复合土钉支护体系施工阶段的灾变机理研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
(WANG Hui. Research on catastrophic mechanism of soil nail-prestressed anchor composite retaining system in construction phase[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.)
- [7] 王皓. 浅谈预应力锚固支护技术[J]. 四川建材, 2019, 45 (1): 81-82, 84.
(WANG Hao. Analysis of prestressed anchor support technology [J]. Sichuan building materials, 2019, 45 (1): 81-82, 84.)
- [8] YAN M J, YUAN Y, XIA T T. Limit analysis under seismic conditions of a slope reinforced with prestressed anchor cables [J]. Computers and geotechnics, 2019, 108: 79-82.
- [9] DELHOMME F. Numerical modelling of anchor bolts under pullout and relaxation tests [J]. Construction and building materials, 2010, 7 (24): 1232-1238.
- [10] WANG H, CHENG J H, GUO Y C. Failure mechanism of soil nail-prestressed anchor composite retaining structure [J]. Geotechnical and geological engineering, 2016, 34: 1889-1898.
- [11] 刘邵民. 浅析基坑工程的施工风险管理[J]. 广东建材, 2008 (2): 122-124.
(LIU Shaomin. Analysis of construction risk management of foundation pit engineering [J]. Guangdong building materials, 2008 (2): 122-124.)
- [12] WANG J X, FENG B, YU H P, et al. Numerical study of dewatering in a large deep foundation pit [J]. Environmental earth sciences, 2013, 69: 863-872.
- [13] ZHOU Y, SU W J, DING L Y, et al. Predicting safety risks in deep foundation pits in subway infrastructure projects: support vector machine approach [J]. Journal of computing in civil engineering, 2017, 31 (5): 847-852.
- [14] WANG W, HAN Z, DENG J, et al. Study on soil reinforcement param in deep foundation pit of marshland metro station [J]. Heliyon, 2019, 5 (11): 2836-2842.
- [15] 谢晓武. 论深基坑工程中基坑监测的作用 [J]. 建材与装饰, 2018 (10): 1-2.
(XIE Xiaowu. The function of foundation pit monitoring in deep foundation pit engineering [J]. Building materials and decoration, 2018 (10): 1-2.)
- [16] 石旭飞, 代雅建, 崔健, 等. 沈阳城市地质环境问题研究 [J]. 地质与资源, 2017, 26 (4): 390-396.
(SHI Xufei, DAI Yajian, CUI Jian, et al. Research on the geological environment of Shenyang city [J]. Geology and resources, 2017, 26 (4): 390-396.)
- [17] 于忠波, 任磊, 皮景坤, 等. 相邻深基坑开挖方式对地下管线的影响分析 [J]. 公路与汽运, 2012, 151 (4): 239-241.
(YU Zhongbo, REN Lei, PI Jingkun, et al. The influence analysis based on the excavation method of adjacent deep foundation piton under ground pipe line [J]. Highways & automotive applications, 2012, 151 (4): 239-241.)
- [18] 龚旭东. 基于受力计算的深基坑支护设计优化方法 [J]. 铁道建筑, 2014, 1 (5): 82-85.
(GONG Xudong. Optimization method for deep foundation pit support design based on mechanical calculation [J]. Railway construction, 2014, 1 (5): 82-85.
- [19] 周辉, 徐荣超, 张传庆, 等. 预应力锚杆内锚固段长度效应研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (9): 2688-2694.
(ZHOU Hui, XU Rongchao, ZHANG Chuanqing, et al. Study of length effect of anchoring section in prestressed anchor [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36 (9): 2688-2694.)
- [20] 黄明辉, 陈乐意. 基于桩锚支护的基坑锚杆安置倾角优化分析 [J]. 南昌航空大学学报 (自然科学版), 2018, 32 (2): 92-98.
(HUANG Minghui, CHEN Leyi. Optimized analysis of inclination angle of anchor pit placement in foundation pits based on pile-anchor support [J]. Journal of Nanchang hangkong university (natural science edition), 2018, 32 (2): 92-98.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)