

桩锚混合围护结构体系在深基坑应用中的受力演化分析

张志¹, 朱正国^{1,2}, 李振源¹, 安海涛¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 河北 石家庄 050043)

摘要:以石家庄地铁3号线东里站轨排井段深基坑施工为研究背景,运用FLAC3D软件对桩锚混合围护结构体系在深基坑中的受力演化规律进行模拟研究。从受力方面对桩锚混合围护结构在深基坑应用中的演化规律进行定量分析,发现支护体系受力随基坑开挖深度的增加而增加;进一步对桩锚围护结构中的锚索轴力损失机理进行探究,得到入射角度在 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内轴力损失较小,增加预加轴力和自由段长度均可适当增加锚索自由段轴力;通过对补偿张拉和超张拉两种锚索预应力补偿措施进行分析,确定最佳锚索预应力补偿措施。

关键词:深基坑;桩锚支护结构;预应力损失;补偿措施

中图分类号: U45 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)02-0033-07

0 引言

城镇化的快速发展促使市区土地供应变得越来越紧张,因此,为满足大型建筑的需要,深基坑工程频繁出现在城市的建设中。在深基坑的建设中支护系统作为重要内容经常被广大学者所研究,如吴文、胡贺松、李宝平等^[1-3]从深基坑中桩锚的位置、刚度等角度对支护结构的受力及变形特征进行了研究,王明龙等^[4]对桩锚支护结构桩内力的变化规律进行了探究,在桩锚支护研究的分析结果上,姜云申^[5]、檀西乐等^[6]进一步从深基坑角度对桩锚支护的适用性和可行性进行了研究,此外,Peck^[7]提出了内支撑大小的计算方法,Bowies^[8]和 Tsui et al^[9]对基坑周围的土体变化规律进行了分析预测,丰富了相关理论研究。

其中,桩锚支护体系主要是将受拉杆件一端固定在开挖基坑侧稳定地层中,另一端与围护桩相联的一种挡土结构^[10-11],其在深基坑施工中得到了广泛的应用^[12-13]。因此,以石家庄地铁3号线东里站轨排井段深基坑施工为工程背景,通过从深基坑桩锚支护体系的受力角度进行分析,以研究其演化规律,之后进一步对锚索预应力损失机理进行探究,并寻找最佳补偿措施,从而为实际施工提供参考依据。

1 工程概况

石家庄地铁3号线东里站深基坑工程位于中华南大街与裕华路高架交叉口立交桥东北侧,施工现场地质土层从上至下依次为杂填土、黄土状粉质黏土、粉细砂、粉质黏土、细砂、含卵砾石中粗砂,地下水水位埋深34.3~34.7 m,另外,由于需要设置轨排井,以满足基坑空间作业要求以及后续大型设备的运送空间,因此决定东里站深基坑轨排井段的支护结构选用钻孔灌注桩+预应力锚索的混合围护结构形式。

收稿日期:2019-01-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20190016

基金项目:国家自然科学基金(51978424);河北省高校百名创新人才支持计划(Ⅲ)(SLRC2017054);河北省人才工程培养经费资助项目(A201802005)

作者简介:张志(1996—),男,硕士研究生,研究方向为地下工程。E-mail:1070658885@qq.com

张志,朱正国,李振源,等.桩锚混合围护结构体系在深基坑应用中的受力演化分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):33-38,45.

2 深基坑桩锚混合围护结构数值模拟

2.1 计算工况

根据大量计算分析,设基准计算条件为:支护桩和预应力锚索均采用结构单元,基坑开挖深度为 16.2 m,并在底部做 0.2 m 厚混凝土垫层,钻孔灌注桩采用 C30 钢筋混凝土,桩长为 21.5 m,桩径为 1 m,桩间距为 1.5 m,桩顶距地表约 1.5 m,其他计算工况如下:

- (1)开挖深度。开挖共分 5 个阶段,深度依次为 3.5 m、7.5 m、11.0 m、14.0 m、16.2 m 等工况。
- (2)锚索锚固深度。共设置 4 道锚索,距地面距离依次为 3.0 m、7.0 m、10.5 m、13.5 m 等工况。
- (3)锚索长度。每道锚索全长由上到下依次为 20.5 m、22 m、20 m、20 m 等工况。

2.2 计算模型和计算参数

为了减小边界效应对数值模拟计算结果的影响,决定土体采用半无限空间,模型计算区深度方向选取 2~4 倍的基坑开挖深度的范围,水平向影响区域选开挖尺寸的 3~5 倍,计算模型在 X、Y、Z 方向分别为 31 m、72.65 m、50 m,采用直角坐标系。由于本基坑宽度方向对称,所以本模型是将基坑沿对称轴分开,对其中一侧进行建模分析,三维计算模型及结构单元布置见图 1。

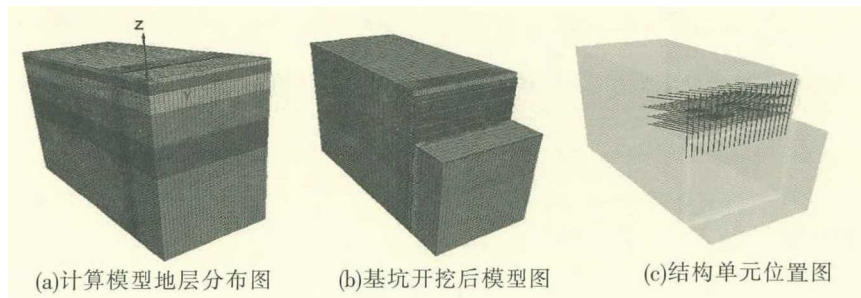


图 1 三维计算模型及结构位置模型

土体视为摩尔-库仑理想弹塑性材料,支护结构均视为弹性材料。钻孔灌注桩采用桩结构单元,锚索采用锚索结构单元。

实体单元参数按给出的压缩模量进行推导得出,公式如下

$$E = E_s \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3)$$

式中, ν 为各土层的经验系数; μ 为各土层的泊松比。

其他参数根据实际工况和现行《铁路隧道设计规范》进行选取,具体参数见表 1~表 3。

表 1 土层、盖梁及腰梁参数

材料种类	弹性模量/MPa	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	内摩擦角/(°)	内聚力/kPa
杂填土	5.0	16.0	0.35	10	5.0
黄土状粉质黏土	44.4	17.7	0.31	20	20.0
粉细砂	80.0	16.0	0.26	28	6.0
粉质黏土	56.4	19.5	0.31	22	23.0
细砂	80.0	18.0	0.26	28	0
中粗砂	100.0	19.6	0.25	35	0
盖梁	30 000.0	24.0	0.20	—	—
腰梁	206 000.0	78.5	0.28	—	—

表 2 支护桩参数

弹性模量/MPa	截面面积/m ²	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	惯性矩/m ⁴	极惯性矩/m ⁴	外圈周长/m
32 500	0.79	2 400	0.20	4.91e-2	9.82e-2	3.14

表 3 锚索主要设计参数

锚索	钢绞线 根数、直径	弹性 模量/MPa	抗拉 强度/kN	水泥浆外 圈周长/m	入射 角度/(°)	拉力设计 值/kN	拉力锁定 值/kN	水平 间距/m	自由段 长度/m	锚固段 长度/m
第一道	3×7Φs15.2	19.5e4	1 012.5	0.47	15	254.79	155	3.0	5.5	15
第二道	4×7Φs15.2	19.5e4	1 350.0	0.47	15	401.21	255	1.5	5.0	17
第三道	4×7Φs15.2	19.5e4	1 350.0	0.47	15	473.79	300	1.5	5.0	15
第四道	4×7Φs15.2	19.5e4	1 350.0	0.47	15	308.53	185	1.5	5.0	15

2.3 计算条件与分析阶段的确定

2.3.1 模型边界条件

模型地表设为真实边界, 不限制位移; 模型前、后、左、右为人为边界, 限制水平位移; 模型底部为人为边界, 限制竖向位移; 模型内部实体单元和结构单元均不限制任何方向位移。

2.3.2 模型开挖阶段的选取

所研究的基坑工程共分 5 个开挖阶段, 每一个阶段的开挖进尺为 0.5 m, 5 个开挖阶段分别是:

阶段 1, 基坑开挖至距地表 3.5 m 处, 在距离地面 3.0 m 处设置第一道预应力锚索。

阶段 2, 基坑开挖至距地表 7.5 m 处, 在距离地面 7.0 m 处设置第二道预应力锚索。

阶段 3, 基坑开挖至距地表 11.0 m 处, 在距离地面 10.5 m 处设置第三道预应力锚索。

阶段 4, 基坑开挖至距地表 14.0 m 处, 在距离地面 13.5 m 处设置第四道预应力锚索。

阶段 5, 基坑开挖距离地表 16.2 m 处, 然后再做 0.2 m 厚的垫层。

2.4 桩锚支护结构体系各部分受力特性分析

2.4.1 预应力锚索受力特性分析

开挖过程中, 选取 4 道锚索中每道锚索中间位置的一根锚索进行分析研究, 第一道锚索轴力~第四道锚索轴力变化规律见图 2~图 5(其他规律图略), 第一道锚索轴力详细数据见表 4(其他数据表略)。

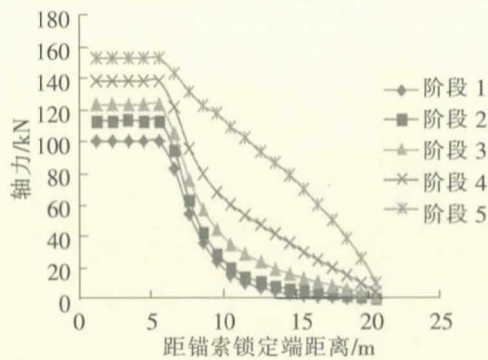


图 2 第一道锚索轴力曲线

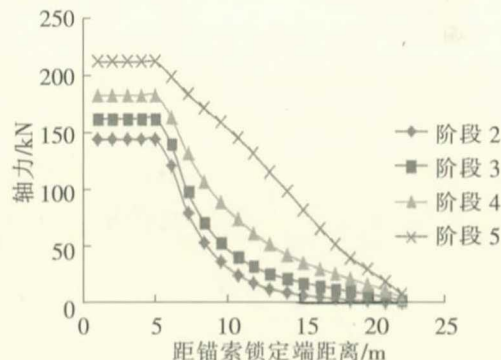


图 3 第二道锚索轴力曲线

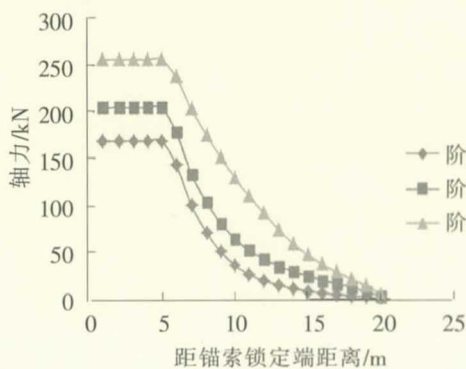


图 4 第三道锚索轴力曲线

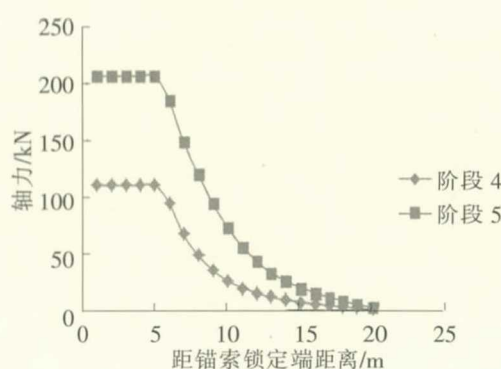


图 5 第四道锚索轴力曲线

表 4 第一道锚索轴力

kN

阶段	距锚索锁定端距离/m															
	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.5	7.5	9.5	10.5	12.5	13.5	15.5	16.5	18.5	19.5	20.5
1	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	82.8	54.0	23.4	15.5	7.1	4.8	2.4	1.7	0.8	0.5	0.2
2	113.1	113.1	113.1	113.1	113.1	94.4	62.8	28.9	20.1	10.7	8.1	5.1	4.1	2.6	1.8	0.7
3	123.1	123.1	123.1	123.1	123.1	105.0	75.9	44.0	34.9	23.4	19.2	13.1	10.7	6.6	4.4	1.8
4	138.2	138.2	138.2	138.2	138.2	121.3	95.5	68.2	60.0	47.2	41.3	30.0	25.0	15.2	10.7	4.0
5	152.8	152.8	152.8	152.8	152.8	143.4	131.8	117.4	109.1	93.1	86.1	70.1	59.9	38.7	26.1	10.6

通过对图 2~图 5 和表 4 分析可得:

(1)同一根锚索,其自由段的轴力基本为定值,而锚固段的轴力则随距锚索锁定端距离的增加而减小。

(2)同一根锚索,其自由段轴力和锚固端轴力均随着基坑开挖深度的增加而增加。

(3)同一根锚索上,锚索锚固段的前半段轴力减小速率较快,后半段减幅较慢。

(4)随着锚索埋深的增加,相邻阶段锚索自由段轴力增加幅度变大。

2.4.2 钻孔灌注桩受力特性分析

随着基坑开挖深度的不断增加,支护桩受力发生规律性变化,开挖结束后桩体弯矩变化曲线见图 6。

通过对图 6 分析可得:

(1)基坑在开挖阶段 3 之前,土体受到扰动并处于多方向变形,使得支护桩弯矩出现多次反转点,预应力锚索也起到了明显的作用,整个支护桩上的弯矩变化较缓和。

(2)基坑在开挖阶段 3 之后,支护桩弯矩变化幅度较大,说明此阶段之后对桩的稳定性影响较大。

(3)基坑开挖结束后,支护桩弯矩最大值出现在距桩顶 10 m(约 0.6 倍的基坑开挖深度)左右的范围内。

(4)随着基坑的开挖,最大弯矩也逐渐增加,且深度越深,最大弯矩的增量也逐渐增大。

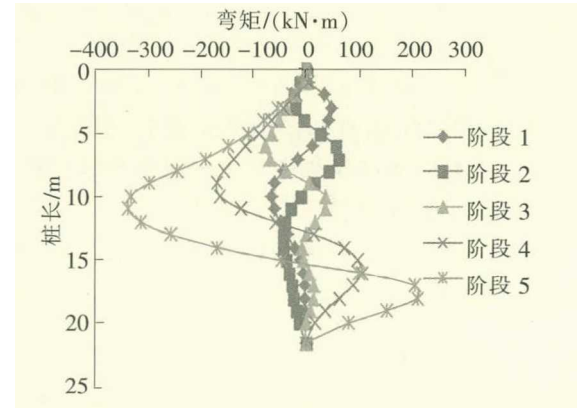


图 6 支护桩桩体弯矩变化曲线

3 预应力锚索施工过程中的预应力损失机理

上一节对锚索、支护桩的应力方面进行了分析,本节将进一步从入射角度、自由段预加轴力和自由段长度的角度对预应力锚索在不同工况条件下的预应力损失机理进行探析。

3.1 计算工况

模型的基本假设、边界条件与上一节一致;地层参数选用了上一节的粉细砂参数;锚索参数除重新定义外其余与上节第一道锚索参数相同,其他未重新定义参数均同上节;开挖阶段选取基坑开挖至距地面 3.5 m 处,在距地面 3.0 m 处设置预应力锚索并施加预加轴力,具体计算方案如下:

方案一,锚索预加轴力为 150 kN、锚索自由段长度为 5.5 m、锚索锚固段长度为 15 m 的基准情况下,锚索入射角度从 0° 至 45° ,增加幅度为 5° ,共 10 种工况。

方案二,锚索入射角度为 15° 、锚索自由段长度为 5.5 m、锚索锚固段长度为 15 m 的基准情况下,锚索预加轴力为 75 kN、100 kN、125 kN、150 kN、175 kN、200 kN、225 kN、250 kN,共 8 种工况。

方案三,锚索预加轴力为 150 kN、锚索入射角度为 15° 、锚索锚固段长度为 15 m 的基准情况下,锚索自由段长度为 4 m、4.5 m、5 m、5.5 m、6 m、6.5 m、7 m、7.5 m,共 8 种工况。

3.2 锚索入射角度对应力损失的影响

通过改变锚索入射角度,对锚索预加轴力的损失情况进行分析,轴力具体数值及损失率见表 5。

表5 锚索自由段轴力

锚索入射角度/(°)	预加轴力/kN	锁定后轴力/kN	损失量/kN	损失率/%
0	150	91.2	58.8	39.2
5	150	92.8	57.2	38.1
10	150	93.3	56.7	37.8
15	150	93.6	56.4	37.6
20	150	93.6	56.4	37.6
25	150	93.5	56.5	37.7
30	150	92.8	57.2	38.1
35	150	91.1	58.9	39.3
40	150	85.3	64.7	43.1
45	150	73.1	76.9	51.3

注:损失量 = 预加轴力 - 锁定后轴力;损失率 = 损失量/预加轴力 × 100%

由计算与表5的分析可知,锚索入射角度在 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的范围时,锚索自由段的轴力损失较小,当入射角度大于 30° 时,锚索轴力损失量和损失率均明显增加。所以施工时可优先在 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的范围选择合适的入射角度,从而达到减少应力损失量的要求。

3.3 其余计算工况锚索自由段轴力分析

同理,通过改变锚索自由段预加轴力和自由段长度,对模型进行数值模拟,探寻其变化规律及机理,因篇幅关系现只给出主要结论:

(1)锚索自由段轴力会随着锚索预加轴力的增大而增大,同时,轴力损失率也逐渐增加,但轴力损失率的增幅逐渐减小;所以,锚索预拉力设计时,可以通过增加锚索预加轴力来提高锚索锁定阶段的轴力,但也应根据实际工程需要选择合适的预加轴力,避免出现资源及能量的浪费。

(2)锚索自由段轴力会随着锚索自由段长度的增加而增加,同时,锚索自由段轴力损失量与自由段轴力损失率也逐渐减小;所以,预应力锚索设计时,可适当增加锚索自由段长度来减小应力损失。

综上所述,锚索入射角度在 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的范围内,适当增加锚索自由段预加轴力和自由段长度可以增加自由段轴力,降低轴力损失率。

4 预应力锚索的预应力损失补偿措施的分析

4.1 计算工况

由上节可知,3种施工方案条件下锚索预应力均有不同程度的损失,因此,本节将从如何降低锚索预应力损失,提升锚索使用效果这一方面,对补偿张拉和超张拉2种应力补偿措施进行分析。通过选取上节3种方案条件中预应力损失较大的3种工况进行重点分析,来对比2种补偿措施的效果,并提出参考意见,3种工况方案如下:

工况1,预加轴力250 kN,补偿张拉第一次张拉150 kN,第二次为100 kN,超张拉一次张拉到250 kN,锚索自由段长度5.5 m,锚固段长度15 m,入射角度 45° 。

工况2,预加轴力350 kN,补偿张拉第一次张拉250 kN,第二次为100 kN,超张拉一次张拉到350 kN,锚索自由段长度5.5 m,锚固段长度15 m,入射角度 15° 。

工况3,预加轴力150 kN,补偿张拉第一次张拉250 kN,第二次为100 kN,超张拉一次张拉到350 kN,锚索自由段长度4 m,锚固段长度15 m,入射角度 15° 。

计算模型和计算条件均同前节。

4.2 补偿效果分析

2种补偿措施在3种工况下的效果见表6。

表 6 各工况下 2 种补偿措施轴力

方案	预加轴力/kN	补偿措施					
		补偿张拉			超张拉		
		锁定后轴/kN	损失量/kN	损失率/%	锁定后轴力/kN	损失量/kN	损失率/%
工况 1	250	129.8	120.2	48.1	108.7	141.3	56.5
工况 2	350	214.1	135.9	38.8	212.2	137.8	39.4
工况 3	250	136.9	113.1	45.2	134.8	115.2	46.1

注:损失量 = 预加轴力 - 锁定后轴力;损失率 = 损失量/预加轴力 × 100%

由计算及表 6 可知,3 种工况下补偿张拉效果均较超张拉要好,但效果差距不大。此外,补偿张拉要比超张拉多一道工序,并有一定的危险性,因此,补偿措施应根据实际情况进行选择,以确保减少应力损失的同时能够更安全、更经济。

5 结论

(1)随着基坑开挖深度的不断增加,锚索轴力与支护桩弯矩均逐渐增大,其中锚索轴力随着距自由段距离的增加而减小,在距锚索锁定端 5~10 m 范围内减幅最大;支护桩在阶段 3 之前弯矩变化平缓且弯矩反转点较多,之后变化幅度较大且反转点减少,最大弯矩值出现在开挖结束后距桩顶 10 m 处。

(2)通过对各种方案的分析,发现锚索入射角度在 5°~30° 的范围内时自由段的轴力损失较小;增加锚索预加轴力使得自由段轴力和轴力损失率均有所增加,但损失率增幅逐渐减小;增加锚索自由段长度可以有效增加锚索自由段轴力,因此可以在合理的角度内增加预加轴力和自由段长度来提高最终锚索自由段轴力,以充分发挥预应力锚索的作用。

(3)通过对比补偿张拉和超张拉 2 种应力补偿措施,发现补偿张拉效果优于超张拉,但效果差距不大,同时工序和危险性也略有增加,因此最终补偿措施还需根据现场实际情况和施工方案进行确定。

参 考 文 献

- [1]吴文,徐松林,周劲松,等. 深基坑桩锚支护结构受力和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001(3):399-402.
- [2]胡贺松. 深基坑桩锚支护结构稳定性及受力变形特性研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [3]李宝平,张玉,李军. 桩锚式支护结构的变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2007(S1):1291-1294.
- [4]王明龙,王景梅. 深基坑桩锚支护中桩内力变化规律数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(3):576-584,627.
- [5]姜云申. 桩锚支护结构在深基坑工程中的应用及研究[D]. 济南:山东大学,2013.
- [6]檀西乐,巩玉志,赵占山,等. 桩锚支护体系在深基坑工程中的应用[J]. 工业建筑,2009,39(S1):732-734.
- [7]Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//7th ICSMFE, State of the Art Volume. Mexico:Balke-ma, 1969.
- [8]Bowles J E. Foundation analysis and design [M]. 4th ed. New York:McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [9]Tsui Y, Cheng Y M. Fundamental study of braced excavation construction[J]. Computers and Geotechnics, 1989,8(1):39-64.
- [10]周永江,何思明,杨雪莲. 预应力锚索的预应力损失机理研究[J]. 岩土力学,2006(8):1353-1356.
- [11]李育枢,谭建忠. 桩锚支护体系在成都深基坑工程中的应用[J]. 铁道建筑,2011(5):77-80.
- [12]吴晓恩,杨平园,李爱民. 桩锚支护结构在湖南运达国际广场深基坑工程中的应用[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程,2008,35(12):50-53.
- [13]李波. 桩锚支护体系在北京一地铁车站深基坑中的应用[J]. 市政技术,2008(4):348-350.

(下转第 45 页)

Study on Tensile Strength of Original Loess in Lanzhou, Gansu

Xu Shanchang, Yu Pengtao, Zhao Xiaofang, Zhang Yuanyuan, Diao Lu

(Tianjin University Renai College, Tianjin 301636, China)

Abstract: Using the vertical and horizontal sampling of the original loess of Wangjiagou Tunnel in Lanzhou, Gansu Province, the paper analyzed tensile properties of undisturbed loess under anisotropic conditions with different loading rate, different loading diameter and different specimen height by fracturing test. The study shows that the tensile strength of the vertical sampling of undisturbed loess is better than that of horizontal sampling; under the condition of arbitrary loading rate, the tension of the specimen penetration depth and tensile strength is closer to the linear relationship. The tensile strength of the horizontal specimen has a strong linear relationship with the diameter of the loaded cylinder. The selected specimen height of 6 cm to 7 cm vertical to undisturbed loess as one of the factors to study the tensile properties of the better.

Key words: undisturbed loess; tensile strength; the anisotropic loading rate; loaded cylinder diameter

(上接第 38 页)

Analysis of Force Evolution of Pile Anchor Mixed Enclosure Structure System in Deep Foundation Pit Application

Zhang Zhi¹, Zhu Zhengguo^{1,2}, Li Zhenyuan¹, An Haitao¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Technology and Innovation Center on Safe and Efficient Mining of Metal Mines, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking the construction of deep foundation pit of the mine drainage section of Dongli Station of Shijiazhuang Metro Line 3 as the research background, the simulation study on the force evolution law of pile-anchor mixed retaining structure system in deep foundation pit using FLAC3D software was conducted. The evolutionary law of pile-anchor mixed enclosure structure in deep foundation pit was quantitatively analyzed from the aspect of stress. It was found that the force of supporting system increased with the increase of excavation depth of foundation pit. Then the mechanism of axial force loss of anchor cable in pile-anchor enclosure structure was further studied, it was found that the axial force loss was less in the range of $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ and the axial force of the free section of the anchor cable could be increased appropriately by increasing the axial force and the length of the free section. Besides, compensation measures of compensate tension and super tension were analyzed to determine the best anchor stress compensation measures.

Key words: deep foundation pit; pile-anchor structure; prestress loss; compensation measures