

软土地层基坑施工过程土锚索受力状态原位试验研究

柳林齐¹, 叶可炯¹, 赵国强¹, 王颖轶²

[1.上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200065; 2.上海交通大学, 上海市 200240]

摘要:针对软土地层深基坑施工扰动引发锚索支护系统预应力损失及其支护效果风险演化等不确定性问题,结合温州机场大型深基坑工程,进行基坑开挖全过程土锚索预应力分布特性及其演化的原位试验。通过实时数据,系统研究基坑开挖过程锚固力变化特性、施工方式和参数对锚固力的影响规律、锚索几何参数对自身受力和作用效果的影响。结果表明,近距离土体开挖卸载对锚索体系的实时锚固力产生较大幅度的突变性影响;随基坑开挖过程,各试样锚固力呈缓慢增大趋势;锚固力的损失与增大,取决于锚索结构的几何参数,当锚索长度大于等于 3 倍基坑深度时,锚固力损失趋于零并呈现逐渐增加趋势。该结果对软土基坑锚索支护设计具有借鉴意义。

关键词:软土基坑施工过程;土锚索支护效果;锚固力变化;原位试验研究

中图分类号: TU447

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)12-0144-06

0 引言

锚索支护体系的作用效果是通过初锚力(预应力)的张拉作用约束控制开挖面位移、改变开挖面岩土体应力状态从而提高岩土体的强度,达到稳定工程结构的目的。锚索结构在二十世纪初即被广泛应用于矿山、隧道、水利工程等领域,形成了成熟的技术体系。随着城市建设工程的规模化,锚索支护方法被逐步推广应用并形成独具特色的土锚索技术体系。迄今国内外已有大量土锚索成功案例,尤其在土体强度较高、稳定性较好、地下水位较低的工程地质条件下,土锚索支护体系以其施工机械化程度高、成本相对较低等优点,得到越来越多的应用。长期以来,人们通过理论分析、数值模拟和模型试验等综合方法,对锚杆(锚索)支护相关的理论和技术问题进行了许多有价值的研究,包括锚杆(锚索)支护体系的受力特性^[1-6]、锚索支护作用机理及其位移控制^[7-13]、锚杆预应力损失特性及其支护参数影响^[14-17]等。

土锚索的支护效果取决于锚索结构的张拉作用,一旦锚索轴向出现超限的缩短位移,将产生预应力损失,其支护作用效果将大大弱化甚至失去。在迄今研究成果和工程设计中,基坑锚索支护的计算通常不考虑施工过程对周边土体的扰动及其可能引起锚头与锚固端的相对位移,导致工程中存在锚索位

移、松弛、预应力损失等不确定性,甚至支护失效的技术风险。因此,软土地层尤其淤泥质强流变性软土地层中采用土锚索体系,存在着锚固端稳定效果难以保障、初锚力损失、土体蠕变位移导致锚索预应力损失等问题,从而可能造成锚索支护体系失效,危及基坑工程安全性等问题。

基于上述考虑,本研究依托温州机场某超大面积基坑工程,通过安装原位监测应力传感器,建立基于监测数据自动采集、远程传输及风险评价系统,获得依托工程施工全过程长锚索预应力实时变化等与施工参数、工程地质参数及扰动状态密切相关的原位实验数据,分析评价软弱地层超大面积基坑长锚索支护抗力、支护效果等的变化特性及其施工参数的敏感性。以期为软土深基坑锚索支护设计及稳定性评价提供理论依据。

1 依托工程概况

本研究依托工程为温州机场交通枢纽综合体及公用配套工程。北邻温州永强机场 T1 航站楼、空管区,东侧基坑距离 T2 航站楼 76 m,距离高架 41 m;基坑南侧、西侧现为农田,西侧距滨海大道 104 m。周边环境条件相对简单,地表建筑物对土锚索影响较小。基坑工程由相毗连的深基坑和浅基坑组成。其中,试验场地基坑 382.6 m × 157.7 m,开挖深度 5.9 m, 6.8 m 和 7 m,面积 59 550 m²。场地工程地质概况如图 1 所示。

基坑坑底位于第②₁₋₃ 淤泥夹粉砂层中,围护钻孔

收稿日期: 2020-12-15

作者简介:柳林齐(1971—),男,学士,高级工程师,从事土木工程行业。

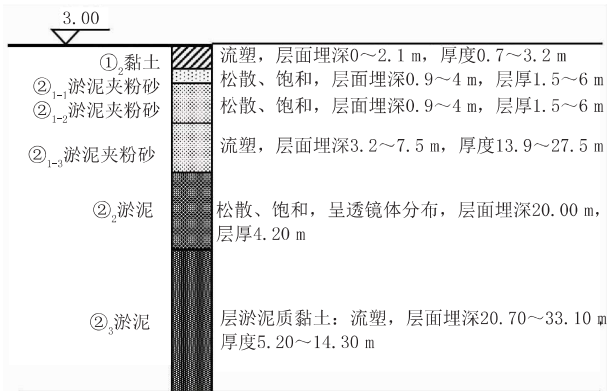


图 1 基坑区域工程地质概况

桩桩底位于第②₃ 淤泥层中。

基坑围护采用 $\phi 700@900$ mm 的钻孔灌注桩围护 + $\phi 650@450$ 三轴搅拌桩止水帷幕 + 两道 $\phi 500@900$ mm 旋喷搅拌加劲桩的支护体系。

基坑采用放坡开挖,浇筑顶圈梁,安装第一道锚杆,并施加预应力;开挖至二道锚杆底,安装第二道锚杆,并施加预应力;开挖至坑底,并及时浇筑素混凝土垫层和底板。

2 原位试验方法

2.1 测区和测点布置

根据设计资料,选取基坑南边中部区域的锚索结构进行监测。测区测点位置如图 2 所示。

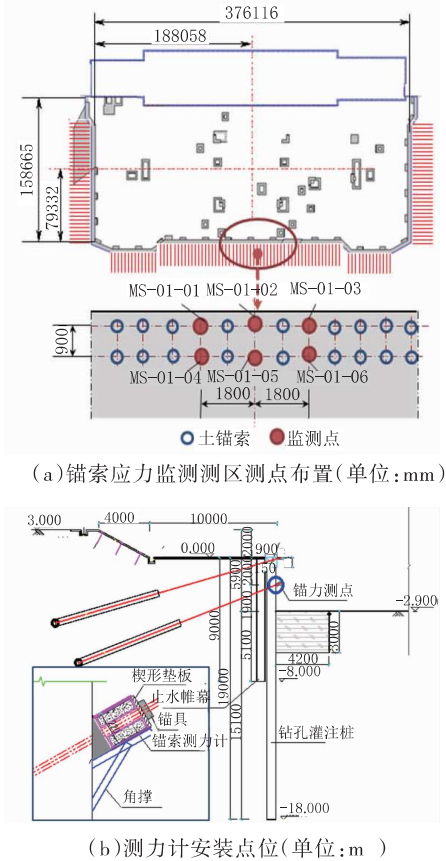


图 2 测点及传感器安装方法示意图

图 2(a)中红色圆点为测点。该测区范围位于基坑长轴的中部,是基坑开挖施工过程土体扰动最敏感区域,同时是基坑工程稳定性风险最高的典型区域。对研究锚索受力随施工过程的变化规律、预应力损失具有敏感性和典型性。

2.2 仪器设备及监测系统

土锚索应力监测系统由锚索测力计、安装辅助机构、自动采集单元、远程传输系统、无线传输网关、用户终端及软件系统组成。设备及技术指标见表 1。

表 1 锚索受力监测系统及其技术性能			
序号	设备名称	设备型号	设备参数
1	锚索测力计	YTMSJ202	量程:250~10 000 kN 传感器精度: $\pm 0.1\%$ FS 测量精度:频率 ± 0.05 Hz;
2	自动采集单位	MICRO-40	温度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;通讯方式:S232/ RS485:9600,8,N,1,GPRS
3	远程数据传输系统	RDTS1000	有效距离 1 000 m;可中继
4	无线通讯模块	GPRS 信号	BGK-MD609;GPRS 调制解调器
5	数据接收服务器	SERVER	普通服务器

2.3 监测系统安装及技术要求

锚索测力计安装除应符合相关规范外,还应保证锚索计安装基面与锚索方向的垂直。检查锚垫板与锚束张拉孔的中心轴线是否相互垂直,允许的垂直偏差范围是 $\pm 1.5^{\circ}$ 。任何超过该偏差范围的安装会导致锚索测力计在锚束张拉过程中在垫板上产生滑动、测值偏小或测值失真。根据图 2(b)所示锚索与水平面设计夹角为 20° ,传感器与锚垫板之间加装楔形垫板进行纠偏,确保相互垂直度。图 3 为锚索测力计安装构成示意图。

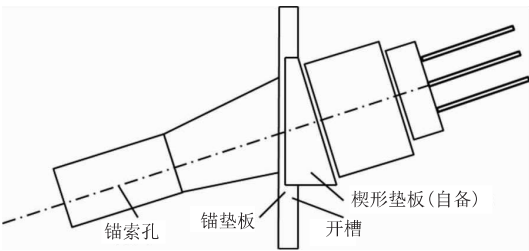


图 3 锚索测力计安装构成示意图

现场安装时,务必在测力计两个承压面均设置承载垫板,以保证平整结合以便荷载均匀传递。承载垫板应经加工平整,不得有焊疤、焊渣及其他异物,必要时还可在承载垫板上增加与测力计或工作垫板相匹配、深度不小于 2 mm 的限位槽,以在安装时方便对中以及预防失稳。同时,锚索测力计应该尽量对中,以避免过大的偏心荷载。

监测系统安装调试应严格满足以下技术要求:

- (1)配套的锚索测力计应置于锚板和锚垫板之间,并尽可能保持三者同轴;
- (2)通过读数仪读出锚力计的编号,并与安装位置一起做记录;
- (3)在加载时宜对钢绞线采用整束、分级张拉,以使锚索计受力均匀;
- (4)加载时,应在荷载稳定后读数;
- (5)在仪器保护箱内安装采集仪器、无线传输模块,将仪器保护箱固定在构筑物表面;
- (6)进行系统调试,用USB转485线连接电脑和采集仪器,设定采集参数(采集时间、频率、周期等),开始采集数据并自动发送给主监测中心,查看监测数据是否正常。否则,检查调整传感器、传输线、GSM网络信号等,直至系统正常工作。

2.4 试验数据采集与传输

未获得基坑施工过程锚索锚固力的实时数据,土锚索受力监测数据采集传输系统由锚索测力传感器、自动采集仪(含无线传输装置)、通信基站、数据及网络服务终端等构成,如图4所示。

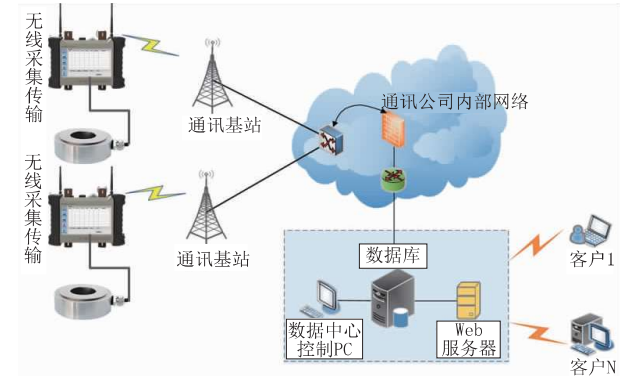


图4 土锚索受力监测数据采集传输系统

数据采集终端软件负责配置采集设备的基本信息及采集频率,支持定时采集,并采用主动式触发数据发送模式,既保证了数据的实时性,又保证了数据的有效性。在系统初始化的过程中,数据采集终端软件可以快速完成设备的采集工作,采集模式分为主动式和问答式两种结构模式,支持前端存储传输脱机工作模式、具备双向备份功能。数据发送到监控中心,软件自动对测量数据进行换算,直接输出监测物理量GPRS/BD网络进行数据传输或者内部局域网方式,完成对传感器数据的采集和监控。

3 结果分析

3.1 基坑开挖过程锚固力变化

试验锚索采用3根φ15.2 mm 高强钢绞线组成,

材料强度为1 860 MPa。每根锚索的设计临界张力为1 012.54 kN,按临界张力的70%设定锚索的锁定荷载为708.78 kN。采用高压油泵和100 t 穿心千斤顶进行张拉锁定。正式张拉前先用20%锁定荷载预张拉一次,再以50%、100%的锁定荷载分级张拉,然后超张拉至110%锁定荷载,在超张拉荷载下保持5 min,观测锚头无位移现象后再按锁定荷载锁定。

试验获得了依托工程基坑施工过程约340天、6个测点的锚索应力监测数据近60万组。各测点传感器型号及其转换参数见表2。

表2 测点传感器型号及标定参数

测点编号	型号	编号	标定系数 $k \cdot 10^{-4} /$ (kN/Hz ²)	初始读数 f_0 / Hz	计算公式
MS-01-		100-			
01		876	6.446	1 868	
02		891	6.425	1 864	
03	YTMSJ	888	6.386	1 870	$p=k(f_0^2-f_i^2)$
04	202	867	6.397	1 871	
05		886	6.412	1 867	
06		901	6.438	1 861	

换算后的锚索应力实时变化如图5所示。

图5(a)~(c)所示测点编号MS-01-1~MS-01-3为上排锚索监测点,横坐标 $T=0$ 为锚索计安装调试完成并进入监测状态的起始时间(2018年1月6日)。结果显示:(1) $T=0\sim 900\text{ h}$,3个测点锚索张力均在预张力水平上保持相对稳定;(2) $T=900\sim 1100\text{ h}$,各测点锚索张力出现不同程度的突变;(3)随后,各测点锚索张力随基坑施工过程保持缓慢增长趋势,直到施工完成。

图5(d)~(f)所示测点编号MS-02-1~MS-02-3为下排锚索监测点,横坐标 $T=0$ 为锚索计安装调试完成并进入监测状态的起始时间(2018年3月16日)。结果显示:(1) $T=0\sim 250\text{ h}$,3个测点锚索张力均在预张力水平上保持相对稳定;(2) $T=250\sim 500\text{ h}$,各测点锚索张力出现不同程度的突变;(3)随后,各测点锚索张力基本保持小幅振荡的动态平衡状态,直到施工完成。

3.2 开挖扰动对锚固力影响

根据施工组织设计,基坑开挖施工分区如图6所示。基坑分成W1区、W2区及W3区,其中W1区分为13段(跳槽开挖施工旋喷搅拌加劲桩),W2区分为14段(由西南和西北侧向中间开挖,从W2区①~⑥顺序施工,保证出土路线),W3区分为7段(由中间向南北侧开挖,从W3区①~④顺序施工)。

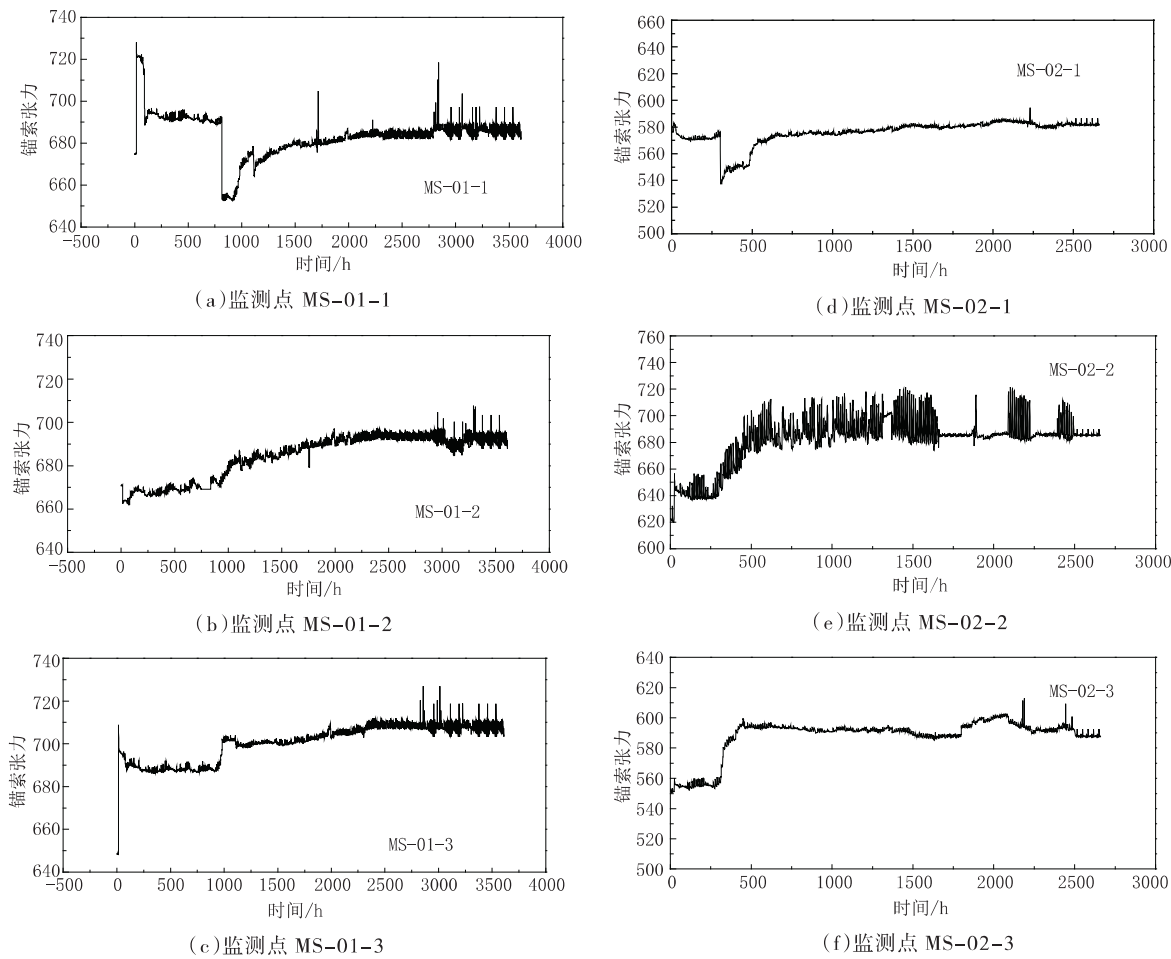


图5 基坑开挖过程各监测点锚固力变化(单位:kN)

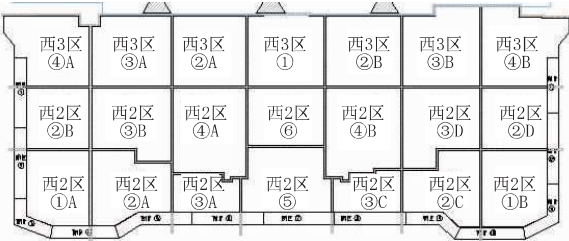


图6 基坑开挖分区示意图

根据施工顺序与监测结果的时间关联关系,对开挖扰动对锚索锚固力影响作概要分析。上排锚索计锚固力随时间变化如图7所示。

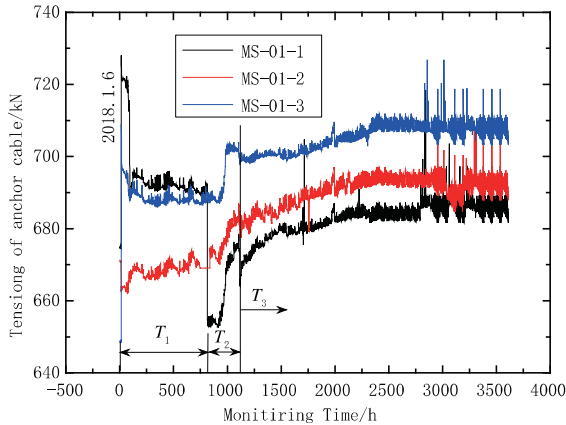


图7 上排锚索锚固力随时间变化

根据施工进度,锚索计进入正常监测前,W1区已完工并进入W2区的施工过程。图7表明:(1)T1对应W2①A和W2②A(W2①B和W2②B)开挖施工阶段,开挖深度为2.5m且开挖区域与测点的最小水平距离为81m,施工对监测区域无扰动影响,锚索总体上保持初锚力不变;(2)T2对应W2③A和W2④A(W2③B和W2④B)及W2⑤开挖施工阶段,监测区域周边土体卸载导致基坑围护结构上浮位移,锚索产生相应张拉变形从而产生相应的附加锚固力;(3)T3对应剩余部分区域的开挖施工阶段,远距离卸载使监测区域产生随施工过程变化的扰动位移从而使锚索产生随时间缓慢增加的附加锚固力。

下排锚索锚固力随时间变化如图8所示。

下排锚索测力计在基坑W2①②③区开挖完成后安装并施加预锚力,基坑进入第二层土体开挖。图8所示的开挖时段对应的施工顺序包括:(1)T1对应第二层土体W2①A和W2②A(W2①B和W2②B)开挖施工阶段,开挖土层厚度为2.5m且开挖区域与测点的最小水平距离为81m,施工对监测区域无扰动影响,锚索总体上保持初锚力不变;(2)T2对应第

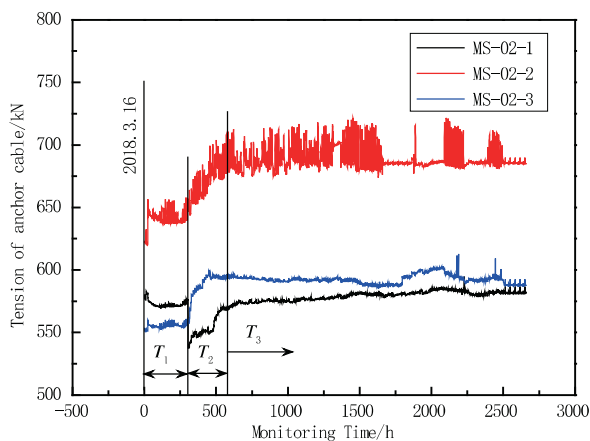


图8 下排锚索锚固力随时间变化

二层土体 W2③A 和 W2④A (W2③B 和 W2④B) 及 W2⑤开挖施工阶段,监测区域周边土体卸载导致基坑围护结构上浮位移,锚索产生相应张拉变形从而产生相应的附加锚固力;(3)T3 对应第二层个区段开挖至坑底标高后分区及时浇筑底板混凝土及剩余部分区域的开挖施工阶段,由于及时分块封底,底板与坑底桩基联合作用,减少了土体上浮位移,从而使锚索锚固力保持基本稳定状态。

3.3 锚索预应力变化的施工因素分析

按照基坑土锚索结构及其受力特征,建立计算模型如图9所示。

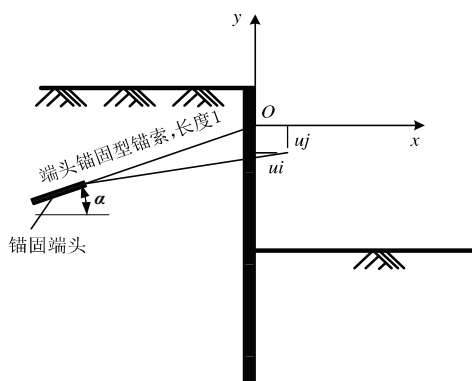


图9 基坑开挖过程锚固力计算模型

当基坑开挖,锚索两端固定点均有可能由于土体扰动产生位移,考虑两端点相对位移可分解为水平及铅垂正交分量。假设:(1)锚索处于线弹性受力状态;(2)锚固端与土体之间无相对位移;(3)锚索锁定端与地墙维护结构无相对位移。则锚索端点位移引起的锚固力变化理论解如式(1)所示。

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \left(1 - \frac{EA}{P_0}\right) \left\{ \sqrt{\left[1 + \frac{1}{\cos \alpha} \frac{u_x}{l} + \frac{u_y}{l} - \tan \alpha \frac{u_x}{l}\right]^2} - \left(\frac{u_y}{l} - \tan \alpha \frac{u_x}{l}\right)^2 \right\} \cos^2 \alpha - 1 \quad (1)$$

式(1)中: P_0 为锚索锁定预应力; ΔP 为锚固力增量; α 为锚索安装角; EA 为锚索抗拉刚度; $\{u_x, u_y\}$ 为锚索锁定端水平及竖向位移; l —锚索标准长度。

根据温州机场基坑锚索支护设计资料,取锚索支护参数见表3。

表3 模拟计算参数

序号	名称	参数值	序号	名称	参数值
1	公称长度/m	20	4	抗拉刚度/kN	1088.752×10^{-4}
2	弹性模量/GPa	200.00	5	预张力/kN	700
3	截面积/mm ²	544.38	6	锚索安装角/(°)	20

模拟锚索锁定端相对位移,根据式(1)可得锚索锚固力随位移变化状态如图10所示。

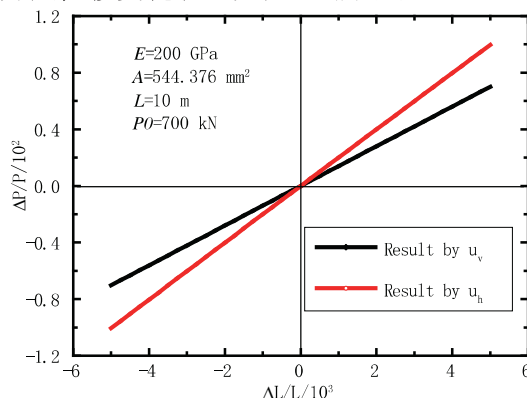


图10 锚固力随相对位移的变化

锚固端不发生位移时,随着锚头的位移,锚头处荷载不断发生变化,随着位移变化率的增大,锚头荷载变化率也随着增大;反之,当锚索固定端与锁定端相对位移增量为负值时,锚索锚固力线性减小,造成锚索预张力的损失。

图10显示:(1)锚索锚固力与锚索两端点相对位移呈线性变化关系;(2)锚固力变化与锚索安装角密切相关,由于工程实际中锚索安装角通常小于30°,因此水平位移对锚固力变化的影响更为敏感;(3)结合式(1),锚索锚固力变化与 $\{E, A, P_0, \alpha, l\}$ 等锚索物理参数和工程设计参数密切相关。

监测结果反映了依托工程基坑工程锚索支护体系在复杂地质条件、施工方式、施工开挖顺序等工程因素及锚索长度、安装角、锚索抗拉刚度、预张力等锚索设计参数的综合影响。其中,前者影响锚索两端的相对位移状态,决定着锚索预张力的增大或减小(损失);后者反映影响程度和参数的敏感程度。那么,如何预测计算锚索两端相对位移的正负、如何定量计算和评价锚索设计参数对预张力变化程度(参数敏感性)影响是软土地层基坑开挖土锚索设计及

其适用性的两个重要问题。

迄今为止研究显示,锚索固定端的位移状态取决于地层物性状态、地连墙或围护结构的插入深度等条件;而锚索锁定端位移与地层的物理力学性质密切相关,当土体极端软弱时,基坑开挖很可能引起周边土体及围护结构产生下沉位移。换言之,锚索两端的相对位移存在诸多不确定性,从而锚索预张力变化存在不确定性。下面以依托工程为例,采用 FEM 数值方法模拟试验位置锚索力学行为,对上述问题作概要分析。基坑中部截面水平位移如图 11 所示。

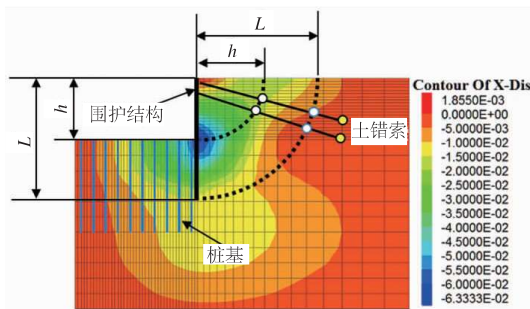


图 11 基坑水平位移分布

图 11 显示,锚索安装位置处于基坑开挖扰动水平位移变化梯度较大区域,锚固端土体位移约 -15 mm ,朝基坑中心方向(坐标反向);锚索锁定端水平位移为零。锚索两端相对位移呈缩小趋势,一定程度上导致锚索预张力损失,参照图 10,锚索预张力损失约 0.2% 。假设锚索两端与土体间无相对位移,根据计算结果,作锚固段水平位移和锚索相对位移随锚索长度的变化如图 12 所示。

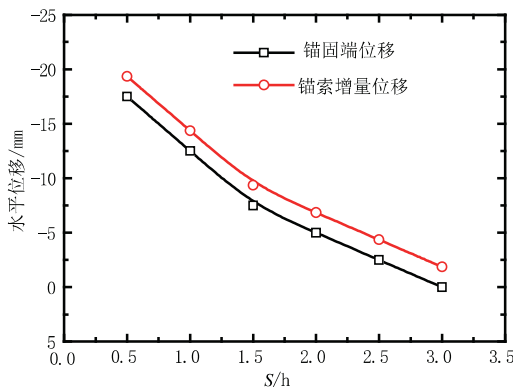


图 12 锚索相对位移随长度变化

图 12 显示,锚固端水平位移及锚索增量位移随锚索长度增大而减小,当锚索长度接近 3 倍基坑深度(锚索安装角 20°),锚索相对位移趋于零。即随着锚索长度增大,锚固力损失量逐渐减小,当锚索长度大于等于 3 倍基坑深度时,锚固力损失趋于零,支护风险可以忽略不计。

4 结 论

研究结果显示,各测点锚索锚固力与基坑开挖时间及其空间位置密切相关,按基坑开挖的区段及时间,锚固力变化呈现三个显著变化阶段。第一阶段为远离测点区开挖(最小距离 60 m),开挖扰动影响微弱,各测点数据呈稳定状态;第二阶段为开挖面近邻监测点位置,开挖扰动影响大,测点数据产生突变,锚固力变化幅值为 $20\sim 50\text{ kN}$;第三阶段为其他远离监测点位的开挖,此时开挖面积增大、土体卸载面积相应增大,扰动影响范围增大,锚固力总体呈现缓慢增大趋势。

结合 FEM 数值模拟计算和理论分析,基坑开挖过程中锚索锚固端及锚头均不同程度受到施工扰动影响。锚索两端的相对位移状态直接影响锚索张力的增加或损失,锚固力变化模式受土体物理力学性质、锚索长度等影响。土体越软弱、锚索长度越短,越容易造成预张力损失;反之,有利于预张力的增长及基坑支护的稳定性。

锚固端水平位移及锚索增量位移随锚索长度增大而减小,当锚索长度接近 3 倍基坑深度(锚索安装角 20°),锚索相对位移趋于零。即随着锚索长度增大,锚固力损失量逐渐减小,当锚索长度大于等于 3 倍基坑深度时,锚固力损失趋于零。

参考文献:

- [1] Farmer IW. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 2006, 12(11): 347-351.
- [2] Wijk, G.A theoretical remark on the stress field around Prestressed rock bolts [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 15(6): 289-294.
- [3] 郑小毅,武金博.基于 Boussinesq 问题解的锚索受力分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 35(3): 637-644.
- [4] Nak-Kyung Kim. Performance of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil [J]. Journal of technical and environmental Engineer, 2003, 129(12): 1138-1150.
- [5] 胡冲,蒋军良,周林才.预应力锚索支护体系在软土基坑中的应用[J]. 地基基础, 2014, 04(12): 1312-1314.
- [6] 郑卫锋,邵龙潭,贾金青.深基坑预应力锚杆锚固段应力分布规律与应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 862-865.
- [7] 李金华,袁兵.土层中锚索拉力与位移关系的研究[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 32-34, 38.
- [8] 韩光,朱训国,王大国.锚索预应力损失的影响因素分析及其补偿措施[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(2): 176-180.
- [9] 吴明雷,李禄.软弱地层锚索预应力蠕变损失研究[J]. 城市勘测,