

DOI: 10.11779/CJGE201510007

基坑锚索预应力损失规律及分步张拉控制措施研究

刘新荣^{1, 2}, 刘永权^{1, 2}, 康景文³, 杨忠平^{1, 2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;

3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 针对基坑工程中锚索预应力损失的特殊性, 采用现场试验的方法, 对分级张拉直至破坏过程中锚索锚固体上剪应力的分布特征以及不同张拉荷载、循环加卸载下锚索应力的损失规律进行了分析; 结合工程实例建立数值模型, 分析了锚索预应力在基坑分步开挖过程中的变化规律, 并对一次张拉和分步张拉两种方案下支护桩的位移和弯矩变化进行了对比分析。结果表明: 锚索锚固体前端的脱黏滑移是锚索初期张拉锁定损失的重要原因, 张拉荷载越小、循环张拉次数越多, 锚索的初期损失率越低; 对于多排锚索支护桩, 上排锚索预应力会因下排锚索施加而减小, 而在整个开挖过程中, 锚索预应力呈现波动增大的趋势; 通过采取分步张拉控制措施, 锚索应力的张拉锁定及开挖损失均得以明显改善, 支护桩在开挖过程中的受力和变形更趋合理, 该控制措施可为类似基坑工程的施工提供借鉴。

关键词: 基坑开挖; 预应力锚索; 预应力损失; 张拉锁定; 分步张拉

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)10-1794-08

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下空间与隧道工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuxrong@126.com。

Prestress loss laws of anchor cables in foundation pits and control measures of tension by steps

LIU Xin-rong^{1, 2}, LIU Yong-quan^{1, 2}, KANG Jing-wen³, YANG Zhong-ping^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 3. China Southwest Geotechnical

Investigation and Design Institute, Chengdu 610081, China)

Abstract: Owing to the prestress loss particularity of the anchor cables in foundation pits, field tests are conducted. The distribution of shear stress on anchorage body is tested in the load tensioned process, and the prestress loss laws under different tensile loads and cyclic loads are analyzed. Through the numerical model of a project example, the prestress change laws of anchor cables in pit excavation process are considered, and the displacement and bending moment of supporting piles are compared between measures of a single tension and tension by steps. The results indicate that the debond slip in the front section of anchorage body is an important factor in prestress loss in tensioned locking process, and that the loss rate of prestress will be reduced under more cyclic tensile times and lower tensile force. For the supporting piles with multi-row anchor cables, the prestress of anchor cables in the upper row will be reduced by the tension of anchor cable in the lower row, and the anchor cable prestress shows a tendency of fluctuating increase throughout the excavation process. Through the control measures of tension by steps, the prestress loss of anchor cables is significantly reduced in the tensioned locking and excavation process, meanwhile, the force and deformation of supporting piles are more reasonable in excavation process. Such control measures can provide a reference for the construction of similar projects.

Key words: foundation pit excavation; prestressed anchor cable; prestress loss; tensioned locking; tension by steps

0 引 言

预应力锚索加固技术能充分调动和提高岩土体的自身强度和自稳能力, 具有主动支护、施工方便等诸多优点, 在边坡加固、基坑支护、矿井施工等领域得以广泛应用^[1-4]。但对于预应力锚索而言, 普遍存在预

应力损失的现象, 尤其对锚固于土体、软岩中的锚索, 损失现象更加明显^[5-7], 锚索应力的损失机制、损失

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372356)

收稿日期: 2014-12-21

*通讯作者

时段以及损失量是工程界普遍关心但尚未很好解决的问题。

预应力锚拉桩作为一种基坑围护结构得以广泛应用,但大量的监测和现场试验^[8-11]均表明,锚索预应力在张拉锁定和开挖过程中存在较大的损失,严重影响基坑开挖过程中的稳定性和最终的围护效果。相对于其他应用领域,基坑锚索大都是一种临时支护,而且往往因地层限制锚固于土层中,其预应力大小会因基坑的开挖及下层锚索的施加而受到很大的干扰,这些因素决定了基坑锚索预应力的损失规律具有其特殊性。此外,从规范^[12]条文来看,基坑锚索预应力的张拉时机、张拉顺序及张拉大小的选择较为固定,很少考虑工程施工中的实际情况,这也导致了很多人因锚索预应力达不到设计值而引起的围护失效。因此,研究基坑锚索在张拉及开挖过程中的预应力损失机理、损失规律以及不同张拉方式下支护桩的围护效果,对于指导预应力锚索的施工具有十分重要的意义。

针对上述问题,本文采用现场试验、数值模拟的手段,对锚固于黏土层中的基坑锚索在张拉锁定及开挖过程中的预应力损失规律进行了研究,分析了锚固体上黏结应力分布随荷载增大时的变化、不同张拉力和循环加卸载时锚索预应力的损失规律,通过数值模拟方法分析了在基坑开挖过程中锚索预应力的变化规律,针对上排锚索预应力会因下排锚索施加产生损失的特点,提出一种分步张拉施工方案,并与一次张拉方案下的围护效果进行对比,得到了一些有益的结论。

1 锚索张拉锁定损失规律现场试验

1.1 工程概况

依托工程地处重庆市渝中区,是一栋超高层建筑的深基坑工程,基坑最大开挖深度 22 m,围护结构采用预应力锚索+排桩的型式,因基岩埋深较大,基坑北侧锚索基本锚固于粉质黏土中,地勘资料表明,黏性土层与锚固段砂浆体之间黏结力较低,实际施工过程中普遍出现锚固力不足的问题。项目共分 3 期,在第一期工程开挖完成后,对支护结构的监测表明,锚索预应力存在较大损失,第二、三期工程在施工过程中锚索预应力损失的现象更加明显。

针对锚索在黏性土中锚固力不足、预应力损失较大的问题,在施工现场开展锚索试验,主要分析在张拉破坏过程中锚索锚固段黏结应力变化特征及预应力张拉损失规律,从而为工程后续施工提供参考。

1.2 试验方法

(1) 试验思路和原理

试验的主要目的是分析锚索在张拉锁定过程中预

应力的损失规律,通过在锚索自由段粘贴应变片,可以达到对锚索预应力变化的实时监测,同时,为进一步分析在锚索张拉过程中砂浆锚固体与土层之间黏结应力的变化,在锚索锚固段布置一定数量应变片,通过受力平衡转化求得黏结应力值。

实际锚索钢绞线采用螺旋式编织,在受拉时径向收缩变形较大,造成粘贴在钢绞线上的应变片测值与实际偏差较大^[13]。为克服这一缺陷,试验采用预应力钢筋替代钢绞线,每组锚索由 A、B 两根钢筋组成,由于试验研究的侧重点为锚固体上黏结应力的分布以及预应力损失率与张拉荷载的关系,因此用钢筋替代锚索并不影响研究问题的实质,以下试验中提到的锚索特指预应力钢筋,试验锚索锚固段结构如图 1 所示。

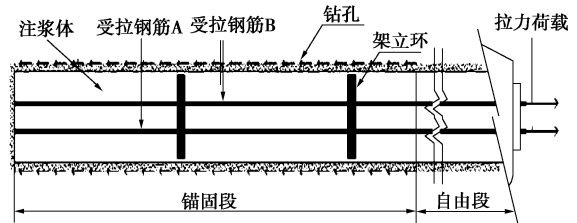


图 1 试验锚索锚固段的结构图

Fig. 1 Structure of anchorage segment in test anchor cables

粘贴在锚索上的应变片读数可以直接通过下式转化为锚索预应力大小:

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

式中, A , E 分别为锚索的截面面积和弹性模量, ε 为应变片的读数。

对砂浆锚固体与土体之间的黏结应力,现场试验难以直接检测,根据如图 2 所示的锚固体轴向受力示意图,可将锚固段划分为数个单元,并在相应截面上布置电阻式应变片检测钢筋轴力,以此来换算该单元锚固体的黏结应力。由平衡条件可得到式 (2),由式 (2) 可进一步得到锚固段黏结强度计算式 (3)。

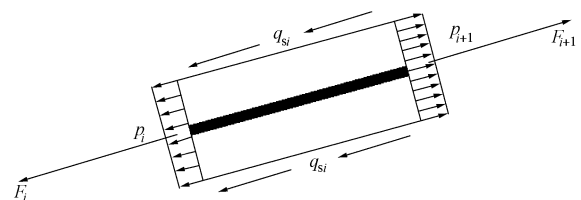


图 2 应变片之间锚固体受力示意图

Fig. 2 Force schematic of anchorage body between strain gauges

$$F_i + q_{si} \cdot s + p_i \cdot a = F_{i+1} + p_{i+1} \cdot a \quad (2)$$

$$q_{si} = \frac{\Delta F + \Delta p \cdot a}{s} \quad (3)$$

式中 F_i 为监测截面锚索钢筋轴力; p_i 监测截面砂浆应力; q_{si} 为锚固单元体与土体黏结应力; ΔF 为监测

截面钢筋轴力差; Δp 监测截面砂浆体应力差, 由于两应变片之间的距离较小, 在本次试验中将两截面的应力差忽略不计; a 为锚固段砂浆截面面积; s 为监测段砂浆锚固体的表面积。

(2) 试验过程

试验基本流程可分为 3 步: 一是试验锚索的设计和制作, 二是锚索安放与注浆, 三是现场张拉采集数据, 现场试验过程如图 3 所示。



(a) 应变片粘贴



(b) 锚索安放



(c) 锚索张拉与数据采集

图 3 现场试验过程

Fig. 3 Process of field tests

a) 锚索设计与制作

试验中锚索采用直径为 25 mm 预应力螺纹钢筋, 其屈服强度标准值 1080 MPa, 极限强度标准值 1230 MPa, 弹性模量 2×10^5 MPa, 采用专用连接器接长。本次试验一共设计 9 组, 鉴于本文的分析侧重点, 主要分析其中 3 组拉力集中型锚索的试验数据, 试验锚索自由段长 5 m, 锚固段长 16 m, 应变片在钢筋上的布置如图 4 所示。粘贴应变片前将钢筋表面打磨光滑, 将接线端子和应变片用胶水粘贴在钢筋打磨光滑的平面上, 再用电烙铁将应变片金属丝与屏蔽导线焊接在接线端子上, 应变片焊接好后, 周围涂刷环氧树脂并包裹玻璃布防水。

b) 锚索安放与注浆

锚孔采用湿作业成孔法, 锚孔直径 150 mm。本次锚索试验采用二次注浆施工工艺, 第一次注浆压力

应控制在 0.35 MPa, 注浆连续进行直到孔内的液体和气泡全部排出孔外, 第二次常压注浆在第一次注浆后 12 h 进行。注浆采用水泥砂浆, 水灰比 0.5, 注浆体强度 M30, 注浆养护期 28 d。

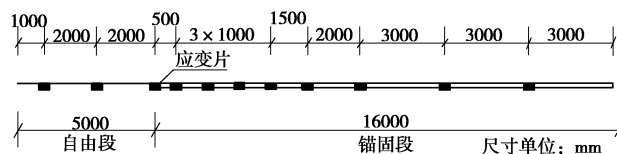


图 4 应变片布置示意图

Fig. 4 Arrangement of strain gauges

c) 现场张拉数据采集

注浆体达到设计强度后, 进行张拉试验。采用整体分级张拉至破坏, 破坏标准为: 锚索拉力不再增大, 位移不断增大; 锚索锚头位移超过 150 mm。锚索张拉荷载分级为 50, 100, 150, 200 kN 破坏荷载。每一级张拉荷载稳定 15 min, 并同时记录锚头位移和数据采集仪中应变片读数。

此外, 在 200 kN 的张拉力条件下进行 4 次循环加载卸载过程, 每次加载达到 200 kN 后稳定 15 min 并卸载, 5 min 后继续加载至设计值, 记录 4 次循环加载过程中锚索自由段应变片读数的变化。

1.3 试验结果及分析

试验结果分析主要针对编号为 #1-1、#1-2、#1-3 三组拉力集中型锚索进行, 对于锚索自由段上应变片的读数, 可直接通过式 (1) 得到锚索预应力的值。对于锚固段上的应变片读数, 需要通过式 (4) 换算成锚固段黏结强度。

$$p_i = \frac{\Delta \varepsilon EA}{\pi D \Delta l} \quad (4)$$

式 (4) 通过式 (3) 进一步转化得到, 式中 p_i 为两个应变片之间锚固体的黏结强度 (kPa); $\Delta \varepsilon$ 为两个相邻应变片读数差值 ($\mu \varepsilon$); E 为钢筋弹性模量, 取 2×10^5 MPa; A 为钢筋截面面积, 为 490.9 mm^2 ; D 为锚孔直径, 取 150 mm; Δl 两个应变片之间的锚固单元长度 (m)。

(1) 锚固段剪应力变化特征

根据现场张拉试验记录的原始数据, 通过计算每两个应变片之间锚固段的剪应力后, 以剪应力为纵坐标, 以锚固段上应变片位置为横坐标, 绘出分级荷载作用下剪应力分布曲线图如图 5 所示。从图 5 可知, 在张拉荷载较小时, 剪应力峰值基本出现在锚固体前端, 随着荷载增大, 峰值逐渐增大并后移, 在极限张拉荷载下, 3 组锚索的峰值基本出现距端口 3~5 m 范围, 从这一变化特征可以判断, 在荷载较大时, 砂浆锚固体前段出现一定程度的脱黏滑移, 针对这一现象, 文献[13]中进行了更为详尽充分的研究, 因此对于在黏土层中的锚索,

在张拉锁定时出现较大预应力损失,除了常见的锚具夹片回弹、锚索自由段回缩等原因,锚固体前端的脱黏滑移也是极其重要的因素。

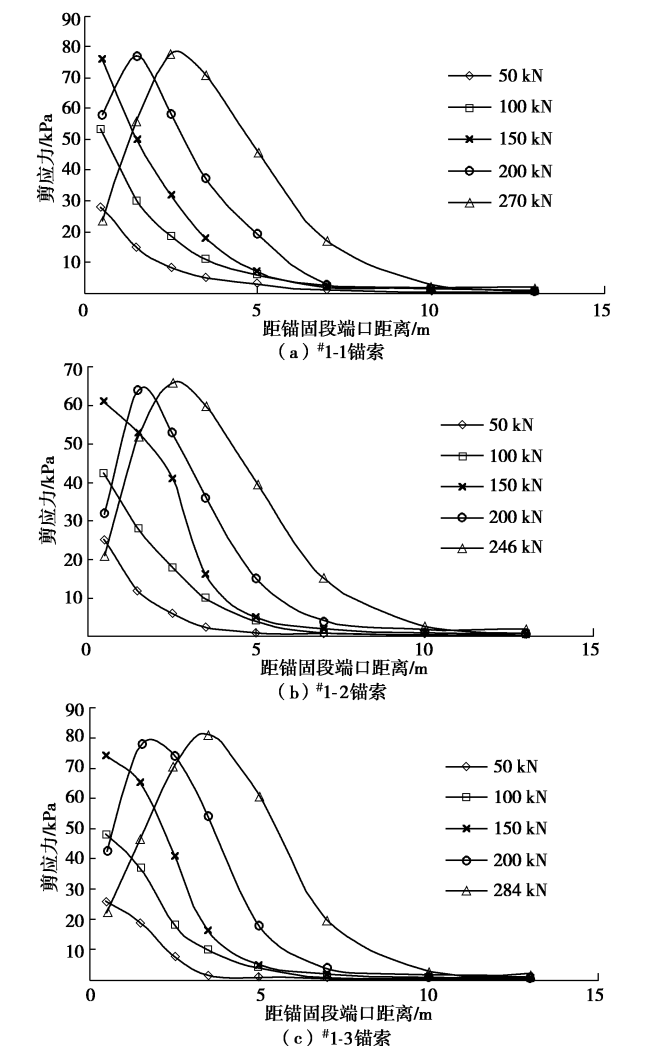


图 5 不同张拉力作用下锚固段剪应力分布
Fig. 5 Distribution of shear stress of anchoring section under different tensile forces

(2) 不同张拉力下锚索预应力损失
提取锚索自由段上应变片的读数,可得到锚索在不同分级张拉荷载作用下的初期锁定值,每次张拉锁定后间隔 15 min,读取 3 组锚索自由段应变片读数,计算得到的锚索预应力如表 1 所示。

表 1 不同张拉力作用下锚索预应力的损失

张拉值 /kN	15 min 后预应力稳定值/kN				平均损失 量/kN	平均损失 率/%
	#1-1	#1-2	#1-3	平均值		
50	41	39	43	41.0	9.0	18.0
100	76	73	84	77.7	22.3	22.3
150	105	98	112	105.0	45.0	30.0
200	134	125	140	133.0	67.0	33.5

从表 1 中计算得到的预应力平均损失率来看,张

拉荷载越大,锚索锁定初期预应力损失越明显,这与上述分析结论相一致,荷载越大,锚固体前端脱黏滑移现象越明显,预应力损失也就越大。

(3) 循环加卸载下预应力损失
由于基坑锚索往往是沿支护桩多排布置,下排锚索预应力的施加会对上排锚索产生一定的卸载效应,之后随着支护桩位移的增大,预应力再次增大,可以看出,锚索的受力类似于一个循环加卸载的过程。为考虑这一过程锚索预应力的损失规律,在 3 组锚索分级加载到 200 kN 时,进行了 4 次循环加卸载,试验结果如表 2 所示。

从表 2 看出,随着加卸载次数的增多,锚索预应力的平均损失率变小,分析其原因,可能是由于前一次加载形成的锚固体脱黏滑移在后一次加载过程中被张拉锁定,从而造成预应力损失的下降,因此,在实际施工中对锚索进行预张拉是十分必要的,且同一锚索多次张拉对于减小预应力损失是有利的。

表 2 循环加卸载作用下锚索预应力的损失

Table 2 Prestress loss of anchor cables under cyclic loading						
加载 次数	15 min 后预应力稳定值/kN				平均损失 量/kN	平均损失 率/%
	#1-1	#1-2	#1-3	平均值		
第 1 次	134	125	140	133.0	67.0	33.5
第 2 次	138	130	141	136.3	63.7	31.9
第 3 次	140	137	146	141.0	59.0	29.5
第 4 次	142	145	153	146.7	53.3	26.7

2 预应力开挖损失特征及分步张拉

从现场试验可知,锚索在张拉锁定初期存在较大的预应力损失,而对于基坑工程中的多排锚索支护桩,上排锚索的预应力还会因下排锚索预应力的施加而产生较大的损失,针对基坑锚索的开挖损失现象,结合依托工程建立数值模型,分析在基坑开挖过程中各排锚索预应力的变化规律,并进一步提出一种减少预应力损失的分步张拉方案,对比分析了两种张拉方式下支护桩的位移和弯矩特征。

2.1 数值分析模型

取依托工程基坑开挖北侧中部一定范围建立平面应变模型。数值模型建立 5 根支护桩,考虑工程实际中每根支护桩间距为 2.2 m,因此模型 x 方向取 11 m。在 y 方向,取基坑开挖中部到嘉陵江路堤高边坡,共 135 m。在竖直 z 方向上,由于地层约 30 m 处即进入强风化泥岩,故竖直方向边界取 50 m,以充分考虑位移边界影响。所建立的长方体模型中,因按平面应变问题考虑,因此约束模型中所有点的 x 方向位移;在 y 方向,对模型的两个边界面约束其 y 方向的速度分量;在 z 方向,约束模型底部 ($z=0$) 的 x , y 及 z 三个方向的速度分量,模型的顶部为自由面。

建立的数值模型如图 6 所示, 模拟中按基坑实际地层状况, 自上而下分别是杂填土、黄色粉质黏土、深灰色粉质黏土、卵石质土、泥岩, 各土层的物理力学参数如表 3 所示, 基坑开挖土体处于黄色粉质黏土和深灰色粉质黏土层上, 而支护桩穿过卵石质土, 底端嵌固于泥岩中, 岩土体采用莫尔-库仑本构模型。

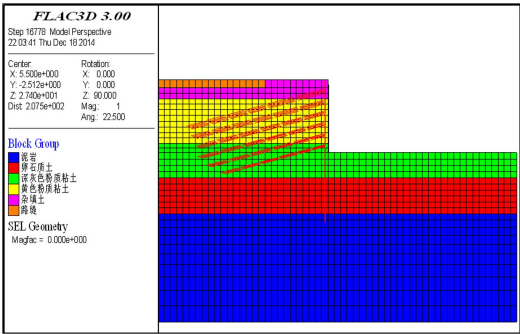


图 6 数值分析模型
Fig. 6 Numerical analysis model

表 3 岩土体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock and soil						
土 层	厚度 /m	密度 /(kg·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	变形模量 /MPa	泊松 比
杂填土	4.2	1850	10.0	5.00	8.0	0.26
灰色黏土	10.0	1930	29.1	18.90	22.5	0.30
黄色黏土	7.6	1920	28.7	19.40	21.5	0.31
卵石层	8.0	2050	0.0	32.00	75.0	0.28
泥岩	24.0	2560	813.0	34.11	2920.0	0.31

依托工程支护桩直径 1.4 m, 间距 2.2 m, 桩长 31 m, 桩顶设置 1400 mm×500 mm 冠梁, 每根桩自上而下布置 6 排锚索, 锚索上下排距 2.5 m, 倾角 15°, 锚索的锚固段长均为 20 m, 自由段长度自上而下分别为 14.0, 12.5, 10.5, 9.0, 7.5, 6.5 m, 锚索设计锚固力 350 kN。

模型中支护桩和桩顶冠梁采用 beam 单元模拟, beam 单元参数由截面积、惯性矩等几何参数和弹性模量、泊松比、密度等材料参数来定义, 几何参数采用实际工程支护排桩、冠梁的尺寸, 冠梁材料参数取 C30 混凝土的值, 支护桩考虑到钢筋的增强作用, 将弹性模量适当增大, beam 单元的模拟参数见表 4 所示。

模型中预应力锚索采用 cable 单元模拟, cable 单元由几何参数、材料参数和注浆体特性来定义, 锚索的自由段和锚固段通过设置不同的砂浆参数来体现, 对于几何参数和材料参数采用实际工程的钢绞线的材料值, 对于 cable 单元的单位长度水泥浆黏结力 c_g , 刚度 k_g 的取值分别采用如下公式计算:

$$c_g = \pi \times D \times \tau \quad (5)$$

$$k_g = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + 2t/D)} \quad (6)$$

式中, D 为锚固段锚固体直径 (即钻孔直径), τ 为锚固体与土体的黏结强度, 由现场锚索试验可得其平均值为 68.8 kPa, G 为锚固浆体剪切模量, t 为锚固段锚固浆体环带厚度。cable 单元的模拟参数如表 5 所示。

表 4 梁单元模拟参数

Table 4 Parameters of beam element						
名称	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg·m ⁻³)	惯性矩/m ⁴		
				I_y	I_z	J
冠梁	30	0.2	2500	0.114	0.015	0.129
排桩	32	0.2	2500	0.189	0.189	0.377

表 5 锚索单元模拟参数

Table 5 Parameters of cable element						
名称	横截面 积/mm ²	弹性模 量/GPa	抗拉 强度 /kN	单位长度 水泥浆黏 结力 /(N·m ⁻¹)	单位长度 水泥浆刚 度/(N·m ⁻²)	水泥浆 外圈周 长/m
自由段	556	195	880	0	0	0
锚固段	556	195	880	28700	1.25×10 ⁹	0.417

2.2 各排锚索预应力的开挖响应

本文数值模拟中基坑分 7 步开挖, 每步开挖深度 2.5 m, 每开挖一步至锚索位置, 施加相应位置锚索预应力 350 kN, 接着进行下一步开挖。记录得到 6 排锚索的预应力随模型计算时步的变化如图 7 所示。

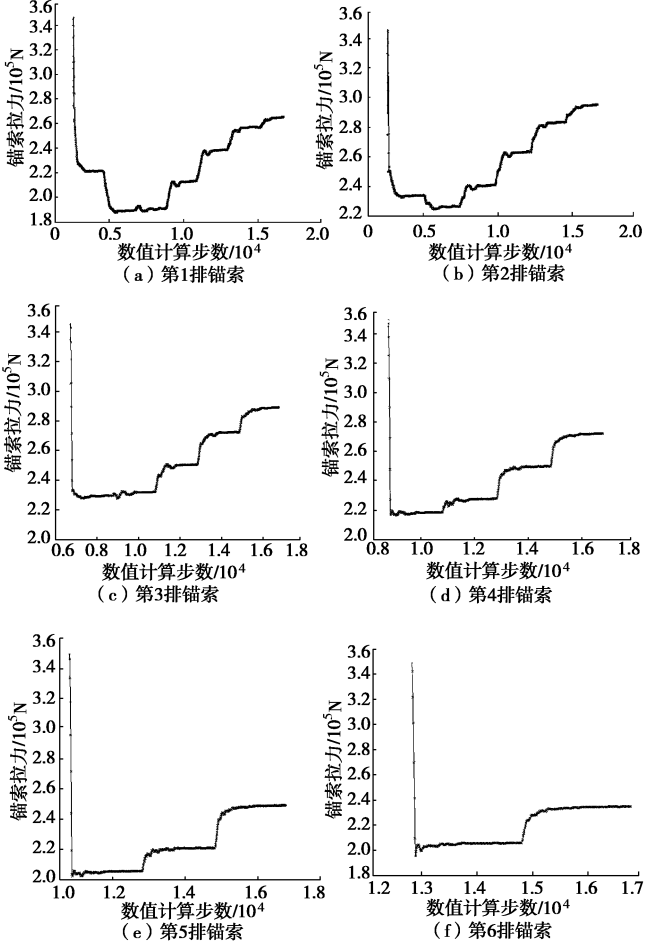


图 7 各排锚索预应力随计算时步的变化

Fig. 7 Prestress changes of each row with calculation steps

从图 7 可以看出, 6 排锚索均在预应力施加后的初始平衡计算中即出现较大的预应力损失, 之后随着基坑土体的开挖呈现波动增大的趋势, 并在开挖完成后趋于稳定, 初期锁定及开挖完成后预应力损失情况见表 6 所示, 由表中数据可知, 从上到下, 锚索预应力的初期锁定及开挖完成损失率均呈现增大的趋势, 而在模型中, 上层锚索的自由段长度大于下层锚索, 由此推断, 锚索自由段越长, 初期锁定损失率越小, 而这与文献[14]的研究结果相符合。

表 6 锚索预应力开挖损失率

Table 6 Excavation prestress loss rate of anchor cables					
锚索排数	设计值 /kN	初期锁定值/kN	最终稳定值 /kN	初期损失率/%	开挖完成损失率/%
第 1 排	350	260	270	25.7	22.9
第 2 排	350	250	295	28.6	15.7
第 3 排	350	234	290	33.1	17.1
第 4 排	350	217	272	38.0	22.3
第 5 排	350	203	248	42.0	29.1
第 6 排	350	192	235	45.1	32.9

从图 6 (a)、(b) 看出, 在第 2 排锚索预应力施加时, 第 1 排锚索预应力出现较大损失, 从 220 kN 下降到 190 kN, 同时, 在第 3 排锚索预拉力施加时, 第 2 排锚索预应力从 235 kN 下降到 224 kN, 从第 3 排锚索开始, 下层锚索的施加不再对上层锚索造成影响, 可以看出, 对于存在多排锚索的情况, 上排锚索预应力会因下排锚索预应力的施加而减损, 锚索越靠近桩顶, 损失现象越明显。

2.3 预应力损失分步张拉控制措施

(1) 分步张拉方案

从上述 6 排锚索的预应力变化曲线可以看出, 前两排锚索的预应力会因下排锚索预应力的施加而减小, 此外, 由现场试验结果, 锚索张拉荷载越小、张拉次数越多, 预应力的损失率越小, 综合考虑上述因素, 制定如下分步张拉方案, 试图减小前两排锚索预应力的开挖损失。

分步张拉方案的施工顺序如下所示:

- ①开挖第一层土、施加第 1 排锚索预应力 150 kN
- ②开挖第二层土, 施加第 2 排锚索预应力 150 kN
- ③开挖第三层土、张拉第 3 排锚索预应力 350kN、补张拉第 1 排锚索预应力至 350 kN
- ④开挖第四层土、张拉第 4 排锚索预应力 350 kN、补张拉第 2 层锚索预应力至 350 kN
- ⑤依次开挖下 3 层土并张拉相应锚索预应力 350 kN 直至开挖结束。

在上述开挖方案中, 在前 2 排锚索初始张拉时仅施加约 1/3 设计预应力大小, 之后通过间隔一个开挖

步补张拉至设计值, 分步张拉的目的是避开下层锚索预应力施加对上层锚索的影响, 同时减小每一步的张拉损失率, 从而减小支护桩在开挖过程中的受力变形。

(2) 分步张拉实施效果

通过采取两种不同的张拉方案, 得到两种工况下支护桩在开挖过程中的位移及弯矩变化情况, 其对比结果如图 8, 9 所示。

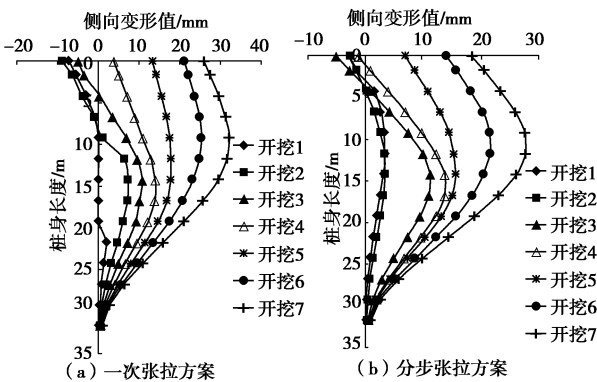


图 8 不同张拉方案下支护桩在开挖过程中的位移
Fig. 8 Displacements of supporting piles under different tension schemes in excavation process

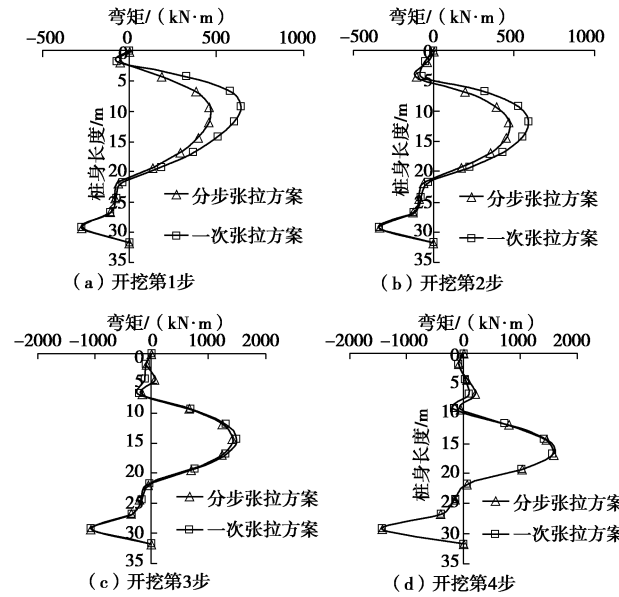


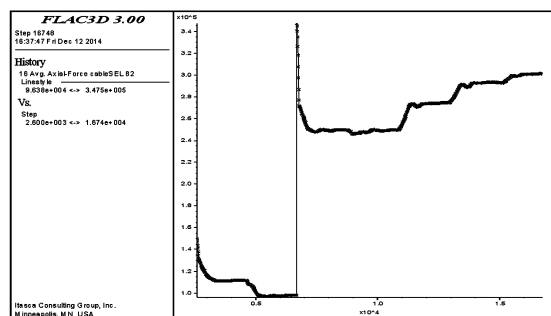
图 9 不同张拉方案下支护桩弯矩值比较
Fig. 9 Comparison of bending moments of supporting piles under different tension measures

由图 8 中可以看出, 相比于一次张拉方案, 分步张拉方案下支护桩在前 3 步开挖过程中挤向侧壁土体的位移大大减小, 而且在开挖完成后, 支护桩的桩顶位移从 25 mm 减小到 18 mm, 桩身最大位移也从 33 mm 减小到 28 mm, 分步张拉对支护桩的位移约束效果更加明显。

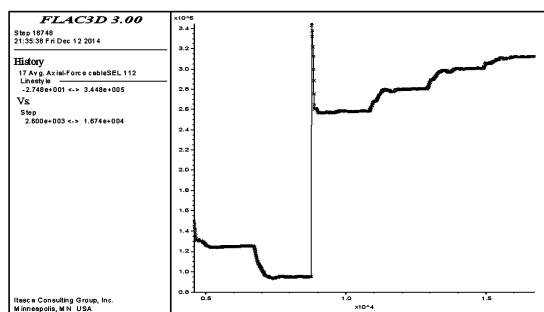
而对于桩身弯矩的影响, 从图 9 可以看出, 在前

2 步开挖过程中, 分步张拉产生的弯矩均小于一次张拉, 而到开挖第 3, 4 步时, 二者弯矩分布基本一致, 可以判断在开挖完成后其弯矩分布变化不大。

通过位移、弯矩两个因素的对比可知, 分步张拉方案可以更好的约束支护桩在开挖过程及开挖完成后的位移, 而且能够改善支护桩在开挖过程中的受力。产生这一有利工况的根本原因在于分步张拉使得锚索开挖预应力损失得到改善, 进一步提取分步张拉方案下前 2 排锚索预应力随计算时步的变化如图 10 所示。



(a) 第1排锚索



(b) 第2排锚索

图 10 分步张拉方案下锚索预应力随计算时步的变化

Fig. 10 Prestress changes of anchor cables with calculation steps under measures of tension by steps

由图 10 可知, 前 2 排锚索的预应力在二次张拉稳定后, 不再因下排锚索预应力的施加而减损, 同时, 由于分两步张拉, 每次张拉力相对较小, 预应力的张拉损失率变小, 第一次张拉 150 kN 后, 初始平衡值分别为 130, 132 kN, 初期损失率平均为 12.7%, 第二次张拉至 350 kN 后的初始平衡值分别为 270, 260 kN, 初期损失率平均为 24.3%, 开挖完成后两排锚索的稳定值分别为 300, 315 kN, 平均损失率 12.1%, 结果均小于表 6 中的数值。

3 讨 论

通过建立数值模型, 对比分析了分步张拉的优越性, 而在实际施工过程中, 出现锚索预应力损失的情况, 一般是根据经验进行超张拉和补张拉予以弥补, 超张拉不仅会对锚具、夹片及支撑结构提出更高的要

求, 而且根据本文的分析, 张拉力越大, 锚索预应力的损失率越大, 效果往往得不偿失。就施工过程而言, 在基坑开挖前期深度不大时施加较大的预应力, 支护桩会在锚拉力作用下挤向基坑侧壁土体, 造成基坑边缘土体产生一定范围的隆起, 对周边土体扰动较大, 而且此时支护桩所受负弯矩 (相对于开挖完成后的支护桩弯矩) 较大, 超张拉会使得支护桩在开挖过程中的受力更加不合理。采取补张拉措施常常是在检测到锚索发生较大应力损失后进行, 是一种事后弥补措施, 此时基坑围护体系有可能已经处于危险状态了, 此外, 当检测到预应力损失时, 基坑开挖往往已经达到一定深度, 重新搭设较高的支架进行补张拉费时费力。

对于分步张拉控制措施, 间隔一个开挖层, 将设计锚索预应力分两步施加, 一般开挖层厚度 2~3 m, 对支架搭设要求低, 操作简易可行, 更重要的是, 该方法能够巧妙避开下排锚索的影响, 同时减少每一步的张拉损失, 使得支护桩在开挖过程中的受力变形更加合理。在本依托工程的后期施工中, 采取分步张拉的施工控制措施, 锚索预应力损失现象得到明显改善, 支护桩顶的最大位移控制在 20 mm 以内, 基坑侧壁土体的沉降和隆起值均控制在 5 mm 以内, 大大减小了基坑开挖对周边环境的影响。

4 结 论

(1) 根据现场试验中锚索锚固体黏结应力的分布和张拉变化, 指出锚固体前端的脱黏滑移是锚索在张拉过程中预应力损失的重要原因。

(2) 通过在不同张拉荷载、循环加卸载下张拉锁定锚索, 得出张拉力越小、张拉次数越多锚索预应力损失率越小的规律。

(3) 通过建立数值模型, 分析了在多排锚索支护下各排锚索预应力随基坑开挖的变化规律, 模型中的前 2 排锚索会因下排锚索预应力的施加而形成预应力损失, 在整个开挖过程中, 各排锚索预应力会在张拉锁定初始阶段产生较大损失, 之后随着土体开挖呈现波动增大的趋势。

(4) 从一次张拉和分步张拉的围护效果对比来看, 采用分步张拉方式能明显改善锚索在张拉和开挖过程中的预应力损失, 使得支护桩在开挖过程中的受力和变形更加合理, 最终的围护效果也优于一次张拉。

参考文献:

- [1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7 - 12. (CHENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil

- Engineering Journal, 2001, **34**(3): 7 - 12. (in Chinese))
- [2] 蒋楚生, 周德培, 周应华. 预应力地梁锚索改善边坡受力状态的理论分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 974 - 976. (JIANG Chu-sheng, ZHOU De-pei, ZHOU Ying-hua. Theoretical analysis for stress state improvement in a slope with the prestressed cable-anchor beam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 974 - 976. (in Chinese))
- [3] 卢萌盟, 沈俊, 曾宪桃. 预应力锚索加固基坑的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1198 - 1202. (LU Meng-meng, SHEN Jun, ZENG Xian-tao. 3-D numerical analysis of reinforcement of pre-stressed cable on pit foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1198 - 1202. (in Chinese))
- [4] 康红普, 吴拥政, 褚晓威, 等. 小孔径锚索预应力损失影响因素的试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(8): 1245 - 1251. (KANG Hong-pu, WU Yong-zheng, CHU Xiao-wei, et al. Tests on affecting factors for pretension loss of cables with small borehole[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(8): 1245 - 1251. (in Chinese))
- [5] 陈沅江, 尹进, 胡毅夫. 软岩边坡锚索预应力定量损失规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1685 - 1691. (CHEN Yuan-jiang, YIN Jin, HU Yi-fu. Research on prestress quantitative loss law of soft rock slope anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1685 - 1691. (in Chinese))
- [6] 刘涌江, 杨静. 预应力锚索加固花岗岩类土质高边坡的现场测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 2924 - 2929. (LIU Yong-jiang, YANG Jing. Field test study of granite soil high slope reinforced by prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 2924 - 2929. (in Chinese))
- [7] 于远祥, 谷拴成, 吴璋, 等. 黄土地层下预应力锚索荷载传递规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12): 2573 - 2580. (YU Yuan-xiang, GU Shuan-cheng, WU Zhang, et al. Experimental study of load transfer law of prestressed cables under loess stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(12): 2573 - 2580. (in Chinese))
- [8] 张明聚, 谢小春, 吴立. 锚索与钢支撑混合支撑体系内力监测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 483 - 488. (ZHANG Ming-ju, XIE Xiao-chun, WU Li. Monitoring analysis of internal force for mixed-support structure of anchor rope and steel support[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 483 - 488. (in Chinese))
- [9] 唐孟雄. 基坑工程预应力锚索锚固力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1158 - 1163. (TANG Meng-xiong. Test study on anchorage force of pre-stressed anchor cables for foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1158 - 1163. (in Chinese))
- [10] 熊智彪, 王启云, 陈振富, 等. 深基坑桩锚支护结构土层预应力锚索工作性能测试分析[J]. 安全与环境学报, 2008, **84**(3): 101 - 104. (XIONG Zhi-biao, WANG Qi-yun, CHEN Zhen-fu, et al. On the working performance testing and analysis with the pre-stressed anchor rope in the soil in deep foundation pit[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, **84**(3): 101 - 104. (in Chinese))
- [11] 朱训国, 杨庆. 深基坑预应力锚索支护监测数据分析与研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, **27**(3): 350 - 354. (ZHU Xun-guo, YANG Qing. The study and analysis of monitoring data for prestressed anchorage in foundation excavation reinforcement engineering[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, **27**(3): 350 - 354. (in Chinese))
- [12] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))
- [13] 王小勇. 黏土层中拉力型预应力锚杆(索)荷载传递试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012. (WANG Xiao-yong. Experimental study of load transfer about tension-type prestressed anchor in clay layer[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] 王渭明, 曹正龙, 王刚刚, 等. 厚冲积层锚索预应力损失研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1607 - 1613. (WANG Wei-ming, CAO Zheng-long, WANG Gang-gang, et al. Prestress loss of anchor cables in thick alluvial clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1607 - 1613. (in Chinese))