

基坑预应力锚索初始张拉锁定值取值规律探讨

刘永权^{1,2}, 刘新荣^{1,2}, 谢应坤³, 余 瑜^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045;
3. 重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 重庆 401121)

摘 要: 针对基坑工程中预应力锚索的特点, 采用理论推导、算例计算、数值模拟及实例分析的方法, 对拉力型、压力型、荷载分散型锚索及锚拉桩上多排预应力锚索的锁定值取值规律进行了探讨。结果表明: 由于锚头刚度的差异, 拉力型锚索的锁定值宜取规范规定范围的小值, 而压力型锚索宜取相应的大值; 荷载分散型锚索应分组张拉锁定, 各分组钢绞线的锁定值与锚索自由段长度、分散间距及锚头位移有关, 且离孔口距离越远, 分段承载体锚索锁定值越大; 锚拉桩上的多排预应力锚索应考虑锚索的张拉顺序采取不同的锁定值, 基于各排锚索张拉锁定后产生的真实锚头位移的差异, 上排锚索宜取较小的锁定值, 下排锚索宜取较大的锁定值。相关规律可为基坑锚索的张拉锁定施工提供有益的参考。

关 键 词: 基坑工程; 预应力锚索; 张拉锁定值; 锚索类型; 锚拉桩

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 06-2164-11

Discussion on selection law of initial stretch locking value of prestressed anchor cables in foundation pits

LIU Yong-quan^{1,2}, LIU Xin-rong^{1,2}, XIE Ying-kun³, YU Yu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Joint Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in the TGR Area (Chongqing University), Chongqing 400045, China;
3. Chongqing Gao Xin Engineering Survey and Design Institute Ltd., Co., Chongqing 401121, China)

Abstract: According to the characteristics of prestressed anchor cables in foundation pit, the principles of selecting the locking values of the tensile anchor cable, pressure anchor cable, scattered-load anchor cable and multi-row anchor cable were discussed through the methods of theoretical derivation, analytical calculation, numerical simulation and example validation. Due to the difference in the stiffness of the anchor head, the results show that according to the specification range, the small locking value is adopted for the tensile anchor cable, but the pressure anchor cable requires the large locking value. Scattered-load anchor cables should be tensioned and locked by groups, and the locking value of steel strand in each group is related to the length of the free segment, dispersion distance and displacement of anchor head. The locking value of the segment bearing body increases with the enlargement of the distance away from the orifice. Different locking values are applied for multi-row anchor cables considering the cable tension locking sequence. Based on the difference of the real anchor head displacement after each row anchor cable is locked, the smaller locking value should be adopted for the upper anchor cables, but the larger locking value is for the lower anchor cables. Therefore, the obtained relevant laws can provide useful references for the stretch locking construction of anchor cables in foundation pit.

Keywords: foundation pit; prestressed anchor cable; stretch locking value; cable type; anchorage pile

1 引 言

预应力锚索(杆)加固技术具有提供主动抗力、将荷载传至深部稳定地层、施工方便等诸多优点,在基坑、边坡及采矿等领域得以广泛应用^[1]。在基

坑工程中,预应力锚索常与支护桩一起构成基坑开挖的围护体系。通过预先施加的拉力值,锚索起到约束支护桩变形的作用,而随着基坑开挖深度的增加,支护桩的侧向变形会进一步增大锚索的拉力值,当基坑开挖完成后锚索拉力值达到设计标准值时,

收稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41372356); 中央高校基金项目(No.106112014CDJZR200008)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372356) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112014CDJZR200008).

第一作者简介: 刘永权, 男, 1986 年生, 博士, 主要从事基坑、边坡等方面的科研和数值模拟。E-mail: liuyongq20@163.com

锚索将达到最优的受力状态。从上述受力特点来看，基坑锚索兼具主动支护和被动支护两方面的特征。

锚索的预加拉力值通过初始张拉锁定来实现，锁定值的选取直接关系到锚索的最终受力是否合理。锁定值过小，难以约束支护桩在基坑开挖过程的变形，锚索将失去主动支护的特点；锁定值过大，由于支护桩的变形，锚索最终拉力值可能会超出设计值，造成锚固失效，锚索难以体现被动支护的特点。因此，结合基坑锚索的受力变形特点，选取合理的初始张拉锁定值，是发挥桩锚协同受力的关键。

针对预应力锚索（杆）锁定值的取值问题，相关文献从不同角度进行了研究。郭院成等^[2]在等值梁计算模型假定下，根据排桩支护结构的水平侧移反演分析了锚杆预应力锁定值的取值；张兴昌等^[3]建立了单支点桩锚支护结构锁定值影响因素的计算模型，研究了基坑深度、锚支点位置等因素对锚杆预应力锁定值取值的影响；王宪章等^[4]根据边坡工程中压力分散型锚索的受力特性并结合实际经验，理论推导了合适的预加拉力值；张亮等^[5]利用自编的结构分析计算软件 Analypile 并结合 Excel 规划求解工具，提出了一种新的预应力锚索设计拉力及锁定值的确定原则和方法。上述已有研究大多针对某一具体的锚索来开展，但基坑工程的实际施工中，采用的预应力锚索类型有多种，而不同类型的锚索的锁定值取值规律必然有其特殊性。此外，当支护桩上存在多排锚索时，各排锚索的锁定值还会受到锚索张拉锁定顺序的影响。对于这些具体问题，目前仍然缺乏系统的对比研究和归纳总结。

基于此，本文结合锚索自身的结构特征，对拉力型、压力型及荷载分散型锚索的初始张拉锁定值的取值规律进行了理论推导和算例计算；在分析锚拉桩上多排锚索真实锚头位移差异的基础上，总结了多排预应力锚索锁定值的取值规律，并依托实际工程建立数值模型，对比分析一种考虑锚索张拉顺序影响的锁定值取值方案，相关结论可为预应力锚索张拉锁定施工提供有益的参考。

2 规范取值及问题提出

《建筑基坑支护技术规程》^[6]（以下简称规范）规定锚索初始张拉锁定值宜按下式计算：

$$P = (0.75 \sim 0.90)N_k \quad (1)$$

式中： P 为锚索的初始张拉锁定值（预加轴向拉力值）； N_k 为锚索轴向拉力标准值。为叙述方便，在本文中将锁定值 P 与 N_k 的比值定义为锁定系数 η ，

则由式（1）可知， η 的取值范围宜为 0.75~0.90。

在实际施工中，可能涉及到锚索锁定值与轴向拉力设计值的关系，在规范条文中，锚索轴向拉力设计值与标准值的关系如下：

$$N = \gamma_F \gamma_0 N_k \quad (2)$$

式中： N 为锚索轴向拉力设计值； γ_F 为作用基本组合的综合分项系数，当按承载能力极限状态设计时， γ_F 不应小于 1.25； γ_0 为支护结构重要性系数，对安全等级为一级、二级、三级的支护结构， γ_0 分别不应小于 1.1、1.0、0.9。

根据式（1）、（2），可计算得到用锚索轴向拉力设计值表达的锁定值取值范围为

$$P = (0.55 \sim 0.80)N \quad (3)$$

作为对比，总结了其他规范对于锚索初始张拉锁定值的取值规定，如表 1 所示。各个规范的取值范围略有不同，但总体而言，当地层及被锚固结构位移控制要求较高时，锁定值较大；位移控制要求较低时，锁定值相对较小。此外，对于某些易出现预应力损失现象的工程，锚索锁定值还会高于轴向拉力标准值。

表 1 不同规范对于锚索锁定值的取值^[6-12]

Table 1 Locking values of anchor cables in different standards^[6-12]

规范名称	编号	规范等级	取值范围
建筑基坑支护技术规程	JGJ120-2012	行业标准	$(0.75 \sim 0.9)N_k$
建筑边坡工程技术规范	GB 50330-2013	国家标准	$(0.75 \sim 0.9)N$
建筑地基基础设计规范	GB 50007-2011	国家标准	$(0.78 \sim 1.17)N_k$
岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范	GB50086-2015	国家标准	$(0.70 \sim 0.85)N$
高压喷射扩大头锚杆技术规范	JGJ/T 282-2012	行业标准	$(0.56 \sim 1.375)N_k$
岩土锚杆(索)技术规程	CECS 22-2005	协会标准	$(0.8 \sim 1.375)N_k$
基坑工程技术规程(湖北)	DB42/T 159-2012	地方标准	$(0.6 \sim 0.8)N_k$

在基坑工程中，锚拉桩在基坑开挖完成后均会出现一定程度的侧向变形，使得锚索在初始锁定后还会出现锚头位移，因此，基坑工程中的锚索锁定值一般情况下均低于标准值，以考虑后期锚头位移产生的附加拉力。

基坑规范给出了锚索初始锁定值的取值范围，但在实际施工中，采用的预应力锚索类型有多种，即使采用相同的设计参数，由于锚索类型的不同，其锁定值取值也会存在差异。对于应用不断增多的荷载分散型锚索，由于各分段承载体钢绞线的长度不同，仅对锚头采用统一的锁定值已难以适用锚索

的受力要求。此外,当锚拉桩上存在多排预应力锚索时,不同位置的锚索在基坑开挖完成后的锚头位移也不一致,其锁定值的取值应与支护桩的变形相协调。对于这些具体的问题,基坑规范并没有给出进一步详细解释,但在锚索的张拉设计和施工中,结合锚索类型、锚索位置选择合理的初始张拉锁定值,对于保证基坑开挖的稳定性、控制支护结构的变形具有十分重要的意义。

3 不同类型锚索张拉锁定值取值

3.1 拉力型与压力型锚索

3.1.1 理论计算

拉力型和压力型锚索的结构示意图如图 1 所示。

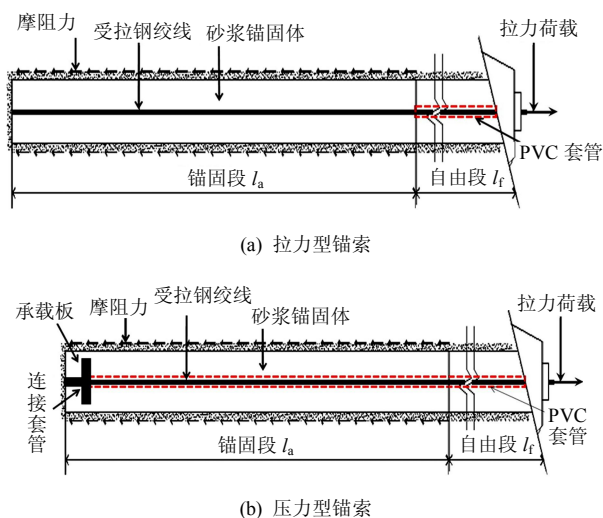


图 1 拉力型、压力型锚索结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of the tensile and compressive anchor cables

压力型锚索通过底端承载板将锚拉力传递到锚固体,锚索全长均与砂浆锚固体无黏结,而拉力型锚索在锚固段范围内通过锚索与砂浆体之间的黏结传递锚拉力。为对比分析两类锚索因结构不同造成的锁定值取值差异,假设两类锚索的锚固段长度 l_a 、自由段长度 l_f 均相同,且忽略锚固体对锚头刚度的贡献,主要考虑锚索对锚头刚度的影响。

对于承受轴向拉力的锚索而言,锚索的刚度 k 的计算式为

$$k = \frac{EA}{l} \quad (4)$$

式中: E 为锚索的弹性模量; A 为锚索的截面面积; l 为除去与砂浆锚固体黏结段后的锚索长度。为叙述方便,本文将其定义为锚索真实自由段长度,对于拉力型锚索, l 等于自由段长度,对于压力型锚

索, l 等于自由段与锚固段长度之和。

由式 (4) 及锚索结构特征可知,在忽略锚固体影响的前提下,拉力型、压力型锚索的锚头刚度 k_1 、 k_2 分别为

$$k_1 = \frac{EA}{l_f}, k_2 = \frac{EA}{l_a + l_f} \quad (5)$$

式中: l_f 为锚索自由段长度; l_a 为锚索锚固段长度。

假设两类锚索在初始锁定后由支护结构变形产生的锚头位移均为 Δx ,且两类锚索在基坑开挖完成后的最终锚索拉力值均为 P ,设拉力型、压力型锚索的初始张拉锁定值分别为 P_1 、 P_2 ,则沿着锚索的轴向方向,有如下力的平衡关系:

$$\begin{aligned} P_1 + k_1 \Delta x &= P \\ P_2 + k_2 \Delta x &= P \end{aligned} \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6) 可得到:

$$\begin{aligned} P_1 &= P - \frac{EA \Delta x}{l_f} \\ P_2 &= P - \frac{EA \Delta x}{l_a + l_f} \end{aligned} \quad (7)$$

由式 (7) 可知 $P_1 < P_2$,即当锚头位移和锚索最终拉力值相同时,拉力型锚索的初始锁定值要小于压力型锚索,两者之间的差值与锚索的自由段及锚固段长度有关。

上述理论计算表明,当两类锚索的设计参数一致时,由于锚头刚度的差异,造成拉力型、压力型锚索的初始锁定值取值存在不同。以下结合算例进一步分析两类锚索锁定值取值的一般规律。

3.1.2 算例分析

设计参数:锚索锚固段长度 $l_a = 20$ m,自由段长度 $l_f = 10$ m,钢绞线弹性模量 $E = 1.95 \times 10^5$ MPa,锚索采用 $3\phi 15.24$ mm($7 \times \phi 5$ mm)型钢绞线,锚索截面面积 $A = 417$ mm²,锚索轴向拉力标准值 $N_k = 450$ kN。

将上述设计参数代入式 (5),可得到 k_1 、 k_2 分别为 $k_1 = 8.13$ kN/mm, $k_2 = 2.71$ kN/mm。

按基坑规范建议,锚索初始锁定值的取值范围宜为 $(0.75 \sim 0.90) N_k$,即 $337.5 \sim 405$ kN。假设拉力型锚索取锁定值的上限值,即 $P_1 = 405$ kN,压力型锚索取锁定值的下限值,即 $P_2 = 337.5$ kN。当锚索拉力值达到标准值 450 kN 时,由式 (6) 计算得到拉力型锚索的锚头位移 Δx_1 和压力型锚索的锚头位移 Δx_2 分别为 $\Delta x_1 = 5.54$ mm, $\Delta x_2 = 41.67$ mm。

按《建筑基坑工程监测技术规范》^[13],对于安

全等级为一级的基坑，锚拉桩桩顶水平位移限值为 25~30 mm。当压力型锚索取较低的锁定值时，锚拉桩因锚索伸长产生的位移就达到 41.67 mm，超出了规范的限值；而拉力型锚索取较大的锁定值时，锚头只需 5.54 mm 的位移就能达到轴线拉力标准值，但实际工程中，锚拉桩的变形极有可能超过这一数值，从而造成锚索的最终拉力值过大。可见，上述两种工况均使得基坑支护处于不良状态。

以锚索在基坑开挖完成后均达到轴向拉力标准值为理想工况，由式 (7) 计算得到在不同锚头位移下，两类锚索的理论锁定值取值如表 2 所示。

由表 2 中数据可知，基坑位移控制要求越高，锚索的初始张拉锁定值越大，且压力型锚索的锁定值均要大于拉力型锚索，在基坑锚拉桩常见的变形范围内 (10~30 mm)，拉力型锚索锁定的锁定系数变化范围为 0.46~0.82，压力型锚索的锁定系数为 0.82~0.94。

表 2 不同锚头位移下锚索锁定值的取值
Table 2 Locking values of anchor cables at different displacements of the anchor head

Δx / mm	拉力型锚索		压力型锚索	
	P_1 / kN	P_1 / N_k	P_2 / kN	P_2 / N_k
10	368.7	0.82	422.9	0.94
20	287.4	0.64	395.8	0.88
30	206.1	0.46	368.7	0.82
40	124.8	0.27	341.6	0.76

综合上述理论推导和算例分析，可将拉力型、压力型锚索锁定值的取值规律总结如下：

(1) 拉力型锚索的锚头刚度相对较大，在锚索初始锁定后，较小的锚头位移就可以达到拉力标准值，如果锚索锁定值偏大，在基坑开挖完成后，由于桩身变形值可能超过锚头位移限值，使得锚索最终拉力值会超过标准值甚至设计值，从而减低了锚索支护的安全储备甚至发生超拉破坏。因此，拉力型锚索在锁定时宜采取较小的锁定值，即可取规范规定范围的偏小值。

(2) 压力型锚索的锚头刚度相对较小，在锚索初始锁定后，需要发生较大的锚头位移才能达到拉力标准值，如果锚索锁定值偏小，在基坑开挖完成后，有可能发生如下两种不良工况：①锚头位移过大（即桩身变形值过大）；②锚索最终拉力达不到标准值（桩身刚度较大，锚头位移小）。上述两种工况都会使基坑支护处于不良状态，因此，压力型锚索在初始锁定时宜取规范规定范围的偏大值。

3.2 荷载分散型锚索

3.2.1 理论计算

荷载分散型锚索的结构示意图如图 2 所示。

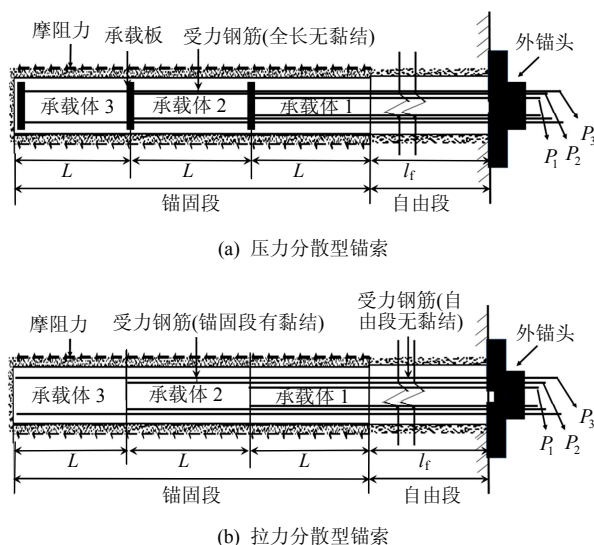


图 2 荷载分散型锚索结构示意图
Fig.2 Structure diagram of the scattered-load anchor cable

由荷载分散型锚索的受力机制可知，当基坑开挖完成后（即锚头位移稳定后）各分组锚索的轴向拉力值趋于相等时，锚索能发挥最大的锚固作用。由于分散型锚索各组钢绞线长度不等，在初始锁定后由相等锚头位移产生的附加拉力值必然不等。要解决这一矛盾，可对各组钢绞线施加不同的初始预加力，即采用不同初始锁定值，以下对该问题进行理论计算。

现以如图 2(a)所示的压力分散型锚索为例进行理论分析（拉力分散型锚索同样适用）。该锚索锚固段由 3 个承载体构成，设 3 个承载体钢绞线的初始锁定值分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 ，假设在锚索锁定后由开挖引起的锚头位移为 Δx ，3 组承载体钢绞线的最终拉力值均为 P ，则有如下的计算公式：

$$P = P_1 + \frac{EA\Delta x}{l_f + L} = P_2 + \frac{EA\Delta x}{l_f + 2L} = P_3 + \frac{EA\Delta x}{l_f + 3L} \quad (8)$$

式中： L 为各分段锚固体长度。

由式 (8) 可得

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P - \frac{EA\Delta x}{l_f + L} \\ P_2 &= P - \frac{EA\Delta x}{l_f + 2L} \\ P_3 &= P - \frac{EA\Delta x}{l_f + 3L} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在实际施工中,可以先确定 P_1 的数值,然后以 P_1 为基准确定其余承载体锚索的锁定值。 P_1 的取值可参考基坑规范按下式取值:

$$P_1 = (0.75 \sim 0.9) N_k / n \quad (10)$$

式中: n 为承载体数量。

由此可得到其余承载体锚索锁定值为

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= P_1 + \frac{LEA\Delta x}{(l_f + L)(l_f + 2L)} \\ P_3 &= P_1 + \frac{2LEA\Delta x}{(l_f + L)(l_f + 3L)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式 (11) 写成一般形式,即第 n 个承载体锚索的锁定值为

$$P_n = P_1 + \frac{(n-1)LEA\Delta x}{(l_f + L)(l_f + nL)} \quad (12)$$

由式 (12) 可知,要使荷载分散型锚索发挥最大的承载力,各分段承载体锚索在张拉锁定值时,存在如下规律:①各分段承载体锚索应分根张拉锁定,离孔口距离越远的分段承载体,其锚索锁定值越大;②各分段承载体锚索的锁定值与锁定后锚头的位移、锚索自由段长度、锚固体分段长度及锚固体位置有关。

3.2.2 算例分析

设计参数:压力分散型锚索锚固段总长 $l_a = 18$ m,各分段锚固体长度 $L = 6$ m,自由段长度 $l_f = 10$ m,钢绞线弹性模量 $E = 1.95 \times 10^5$ MPa,钢绞线直径 15.24 mm ($7 \times \phi 5$ mm),锚索截面面积 $A = 139$ mm²,锚索轴向拉力标准值 $N_k = 600$ kN。

当基坑开挖完成后,各承载体钢绞线最终拉力值均达到 $P = N_k / n = 200$ kN 时,锚索能发挥最大的承载力。根据算例参数及式 (9),可得到在不同锚头位移下各分段承载体锚索理论锁定值取值如表 3 所示。

表 3 不同锚头位移下各分段承载体锚索的锁定值
Table 3 Locking values of segment bearing body at different displacements of the anchor head

Δx / mm	承载体 1		承载体 2		承载体 3	
	P_1 / kN	P_1 / P	P_2 / kN	P_2 / P	P_3 / kN	P_3 / P
10	183.06	0.92	187.68	0.94	190.32	0.95
20	166.12	0.83	175.36	0.88	180.64	0.90
30	149.18	0.75	163.04	0.82	170.96	0.85
40	132.24	0.66	150.72	0.75	161.28	0.81
50	115.30	0.58	138.40	0.69	151.60	0.76

从表 3 中数据可知,各分段承载体锚索的锁定

系数 η 已不限于规范的 0.75~0.90 取值范围,在位移控制要求高时,会超过上限值 (如 0.95),位移控制要求低时,会低于下限值 (如 0.58)。总体而言,位移控制要求越严,锚索锁定值越大。要使各分段承载体最终均达到 200 kN 的锚拉力,初始锁定值需满足:承载体 3 > 承载体 2 > 承载体 1,且三者之间的差值随着锚头位移的增大而增大。

在实际施工中,可先根据规范要求确定承载体 1 锚索的张拉锁定值 P_1 ,之后根据式 (12) 确定其余承载体锚索锁定值,本算例中取 $P_1 = 0.8 N_k / n = 160$ kN,由式 (12) 计算得到不同锚头位移、确定的 P_1 下各承载体锚索锁定取值如表 4 所示。

表 4 确定的 P_1 下各分段承载体锚索的锁定值及最终值
Table 4 Locking and final values of segment bearing body after the determination of P_1

Δx / mm	P_1 / kN	P_2 / kN	P_3 / kN	P / kN
10	160.00	164.60	167.26	176.94
20	160.00	169.20	174.52	193.88
30	160.00	173.80	181.78	210.82
40	160.00	178.40	189.04	227.76
50	160.00	183.00	196.30	244.70

由表 4 中数据可知,当 P_1 取 160 kN 的初始锁定值时,锚头位移量需控制在 20~30 mm 之间才能使各分组钢绞线最终拉力值满足设计要求。可以推断,当基坑位移控制目标较高时 (<20 mm), P_1 需要取更大的值,当允许基坑发生大于 30 mm 的变形量时,可取更小 P_1 值,由此即可建立 P_1 与基坑位移控制目标的关系。

4 多排锚索张拉锁定值取值

4.1 不同张拉顺序下锚索的真实锚头位移

根据相关文献[14—16]的研究,多排锚索锚拉桩在基坑开挖完成后最终呈现类似于“大肚状”的变形形态,从而使得锚拉桩在各排锚索锚头位置处的绝对位移量存在差异。此外,由基坑逆作法的施工特征可知,各排锚索的张拉锁定时机不同,下排锚索在张拉锁定时支护桩已经发生部分侧向位移,而锚索后期锚拉力值的增加与这部分位移量是无关的。本文将锚索张拉锁定后支护桩产生的侧向变形定义为锚索的真实锚头位移,相对应的,将锚索锚头所在位置点支护桩产生的绝对位移定义为视锚头位移,两者之间的区别如图 3 所示。

由图 3 可知,由于基坑支护具有逆作法的施工特征,锚索的张拉锁定均是在基坑分层开挖至锚索所在位置后才能进行,而此时支护桩已经因上部岩

土体的开挖发生了部分变形,因此,每一排锚索的真实锚头位移 Δx 均小于其视锚头位移 Δy ,与此同时,在锚索锁定后,其后期附加锚拉力值的主要由真实锚头位移的增加而形成。基于这一规律,考虑到锚拉桩上各排锚索的张拉锁定顺序不一致,必然造成各排锚索对应的真实锚头位移存在较大差异,因此,其初始锁定值的取值应基于各排锚索产生的真实锚头位移来选取。

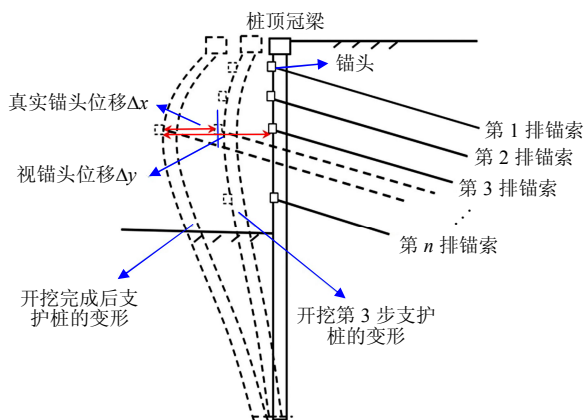


图3 真实锚头位移与视锚头位移的区别

Fig.3 Difference between real and apparent anchor head displacements

假设第 n 排锚索在张拉锁定结束后,锚头位置支护桩已经发生的侧向变形为 x_n ,而基坑开挖完成后该锚头位置支护桩的变形为 x'_n (即视锚头位移),设初始锁定值为 P_n ,锚索拉力标准值为 P ,锚索真实自由段长度为 l_n ,则第 n 排锚索的初始锁定值 P_n 为

$$P_n = P - \frac{EA(x'_n - x_n)}{l_n} \quad (13)$$

由式(13)可知, $x'_n - x_n$ 为锚索的真实锚头位移,其大小除了与视锚头位移 x'_n 有关之外,还与锚索的在张拉锁定时已经发生的锚头位移 x_n 有关,前述可知,多排锚拉桩在基坑开挖完成后的变形往往呈现“大肚状”,即中间各排锚索的 x'_n 较大,而锚索张拉顺序对锁定值的影响主要体现在 x_n 的取值上。

以文献[17]中多排锚索锚拉桩为例,进一步分析张拉锁定顺序对锚索真实锚头位移的影响。锚拉桩在7个分步开挖过程中的侧向变形及相应6排锚索的真实锚头位移如图4所示。由图中数据及锚索位置可以得到6排锚索的真实锚头位移如表5所示。

由表5中数据可知,前3排锚索的真实锚头位

移相差不大,在21~24 mm之间变化,而后3排锚索的真实锚头位移减小明显,其中第4排锚索为17.841 mm,相比前3排减少约22%,第5排、第6排锚索在锁定后发生的锚头真实位移更小,其中第6排的真实锚头位移仅为前3排的1/4。

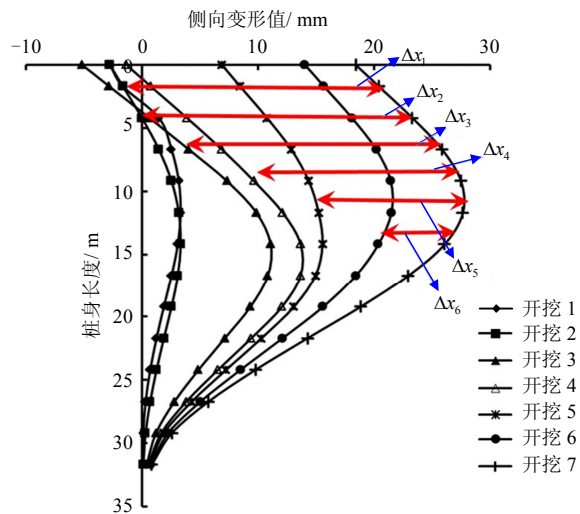


图4 基坑开挖过程中支护桩的侧向变形^[17]

Fig.4 Lateral deformation of supporting piles in excavation process^[17]

表5 6排锚索的真实锚头值

Table 5 Real anchor head displacements of six rows of anchor cables

锚索排数	视锚头位移 x'_n / mm	张拉锁定时支护桩锚头位置已经发生位移 x_n / mm	真实锚头位移 $x'_n - x_n$ / mm
第1排	20.376	-1.674	22.050
第2排	23.283	-0.028	23.311
第3排	25.848	4.021	21.827
第4排	27.477	9.636	17.841
第5排	27.639	15.210	12.429
第6排	26.073	20.358	5.715

由文献[17]的算例分析可知,当支护桩上存在多排锚索时,由于各排锚索的张拉顺序不同,对应的锚头真实位移差异较大,当不考虑锚索的张拉顺序而对各排锚索选择相同的锁定系数,其结果将使上排锚索的最终拉力值明显大于下排锚索。对各排锚索选择相同的锁定系数,其不足在于:会使得各排锚索受力不均匀,严重情况下会使得上排锚索的锚拉力值超过设计值甚至极限值,下排锚索的锚拉力值远低于设计值,因此,为使各排锚索在基坑开挖完成后受力均匀,在选择初始锁定值时,应对上排锚索选用相对较小的锁定值,而对下排锚索选用相对较大的锁定值,而这种相对大小应结合各排锚索在张拉锁定后发生的真实锚头位移大小来确定。

4.2 实例分析

4.2.1 工程概况

本工程位于重庆市渝中区，为一临江超高层建筑的基坑，基坑最大开挖深度 22 m。基坑北侧靠近城市道路，道路外侧为临江高边坡，该侧围护结构采用多排预应力锚索+锚拉桩的型式，锚拉桩直径为 1.4 m，间距为 2.2 m，桩长为 31 m，桩顶冠梁尺寸为 1 400 mm×500 mm，锚拉桩上共布置 6 排预应力锚索，锚索倾角为 15°，排距为 2.5 m，自上而下锚索的自由段长度分别为 14.0、12.5、10.5、9.0、7.5、6.5 m，6 排锚索的锚固段长度均为 20 m，锚索轴向拉力标准值均为 450 kN，支护结构剖面图如图 5 所示。

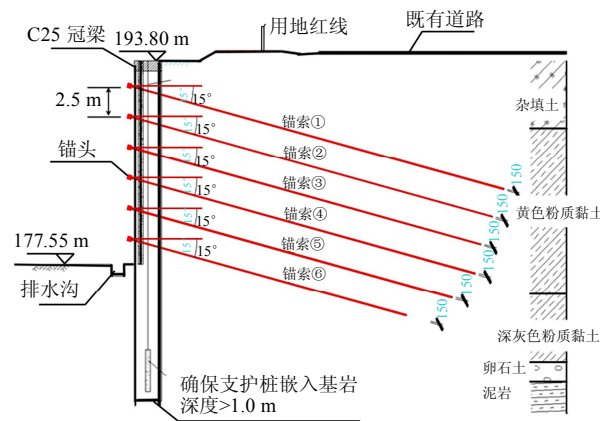


图 5 基坑北侧支护结构剖面图

Fig.5 Sectional view of the supporting structure on the north side of the foundation pit

4.2.2 数值计算模型

针对基坑北侧支护体系，采用 FLAC^{3D} 建立的平面应变数值分析模型如图 6 所示。模型 x 方向（厚度方向）为 11 m，共建立了 5 根支护桩（5×2.2 m）； y 方向（长度方向）从基坑开挖中部取至临江高边坡，共 135 m；模型 z 方向（竖直方向）从地表取至泥岩一定深度，共 50 m。由于是平面应变问题，约束模型中所有单元在厚度方向（ x 方向）的位移；在模型两侧约束 y 方向的速度分量；模型底部采用固定约束边界条件，对 x 、 y 、 z 3 个方向的速度分量进行约束，模型顶部为自由边界面。

根据基坑的实际地层状况，模型自下而上分别为泥岩、卵石质土、深灰色粉质黏土、黄色粉质黏土、杂填土、路堤及路面，岩土体的物理力学参数取值如表 6 所示，模型中的实体单元均采用 Mohr-Coulomb 本构模型。基坑共分 7 个开挖步，每开挖至锚索设计位置，施加锚索拉力值，在锚索拉力值

稳定至设计锁定值后，进行下一步开挖，直至开挖到基坑底部。

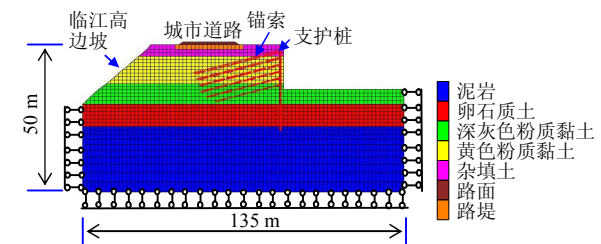


图 6 数值分析模型

Fig.6 Numerical analysis model

表 6 岩土体物理力学参数

Table 6 Physical and mechanical parameters of rock and soil

土层	厚度 / m	密度 / (kg/m ³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	变形模量 / MPa	泊松比
路堤	1.0	2 450	500.0	35.00	200.0	0.20
杂填土	4.2	1 850	10.0	5.00	8.0	0.26
灰色黏土	10.0	1 930	29.1	18.90	22.5	0.30
黄色黏土	7.6	1 920	28.7	19.40	21.5	0.31
卵石质土	8.0	2 050	0.0	32.00	75.0	0.28
泥岩	24.0	2 560	813.0	34.11	2 920.0	0.31

在数值分析中，锚拉桩和桩顶冠梁采用梁（beam）单元模拟，预应力锚索采用索（cable）单元模拟，beam 单元及 cable 单元的模拟参数见表 7、8 所示。

表 7 梁单元模拟参数

Table 7 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	2 500	0.114	0.015	0.129
排桩	32	0.2	2 500	0.189	0.189	0.377

表 8 锚索单元模拟参数

Table 8 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)	单位长度水泥浆刚度 / (N/m)	水泥浆外套圈周长 / m
自由段	556	195	880	0	0	0
锚固段	556	195	880	2 8700	1.25×10 ⁹	0.417

4.2.3 3 种张拉锁定方案

为对比分析初始锁定值对各排锚索最终拉力值的影响，在数值模拟中设计了如下 3 种张拉锁定方案：方案 1，6 排锚索均取较低的锁定系数，即 $\eta = 0.75$ ；方案 2，6 排锚索均取较高的锁定系数，即 $\eta = 0.90$ ；方案 3，考虑各排锚索真实锚头位移的差异，

对各排锚索取不同的锁定值，各排锚索相应的锁定系数如表 9 所示。

表 9 3 种张拉锁定方案的锁定系数 η 取值
Table 9 Values of locking coefficient η in three kinds of stretch locking schemes

方案	锚索①	锚索②	锚索③	锚索④	锚索⑤	锚索⑥
1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
2	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
3	0.75	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95

根据图 4 和表 5 中数据可知，前 3 排锚索在张拉锁定后产生的真实锚头位移较大，其锁定系数应取相应的低值，后 3 排锚索产生的真实锚头位移不断减小，因此，其锁定系数应不断增大，至第 6 排锚索取最大的锁定系数。考虑到张拉顺序对 6 排锚

索真实锚头位移的影响，方案 3 中选取了如表 9 所示的锁定系数，以此平衡因后期锚头位移不同而造成各排锚索拉力值的不同。

4.2.4 数值计算结果及分析

在数值模拟中，锚索在施加一定的预加拉力值后，会因锚索本身的伸长及锚固段的脱黏滑移产生较大的初始损失，对比实际工程中锚索的锁定过程，可将模拟中发生初始损失之后稳定的锚索拉力值看成是初始锁定值。通过不断地调整预加拉力值，使得锚索在发生初始损失后的稳定拉力值等于各方案中的设计锁定值，以第 3 排锚索为例，在不同的锁定系数下，锚索在数值计算过程中的锚拉力变化如图 7 所示。

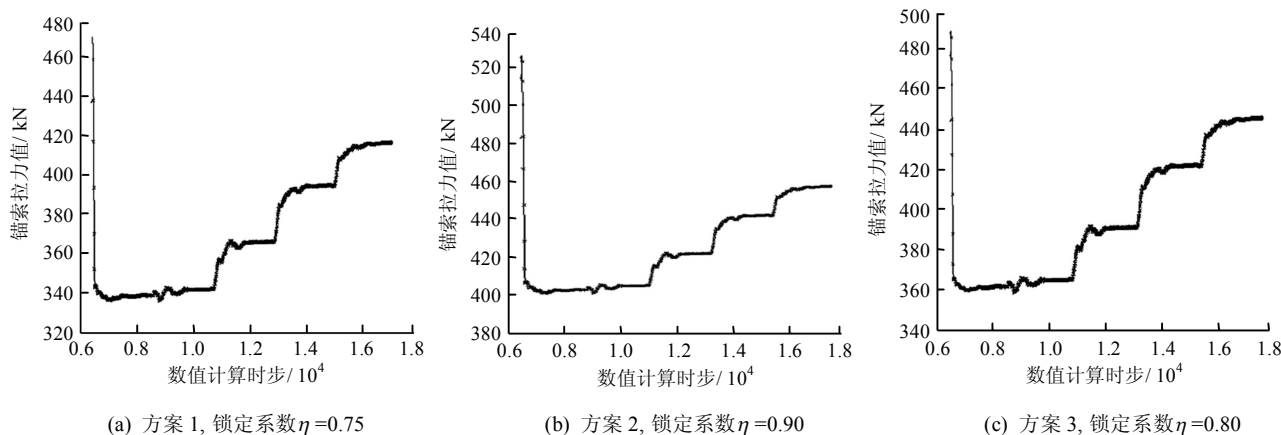


图 7 不同锁定系数下第 3 排锚索拉力随计算时步的变化

Fig. 7 Cable tension of the third row changes with calculation time step under different values of η

由图 6 可知，在 3 种锁定方案中，第 3 排锚索随计算时步的变化趋势是一致的，均表现为随着后续开挖而不断增大，在锁定值分别为 338、360、405 kN（即 η 分别为 0.75、0.80 及 0.90）时，锚索最终拉力值分别为 419、446、459 kN。提取其余各排锚索在 3 种方案下的最终拉力值如表 10 所示。

表 10 不同锁定方案下 6 排锚索的最终拉力值（单位：kN）
Table 10 Final tensile forces of 6 rows of anchor cables under different locking schemes (unit: kN)

方案	锚索①	锚索②	锚索③	锚索④	锚索⑤	锚索⑥
1	425	431	419	405	395	383
2	467	475	459	445	443	428
3	448	456	446	439	433	435

从表 10 中数据可以看出，当 6 排锚索均取较低的锁定值（方案 1）时，6 排锚索的最终拉力值均没有达到 450 kN 的标准值，其中第 4、5、6 排锚索差异幅度较大，将会一定程度上降低锚索对支护桩的

约束作用；当 6 排锚索均取较高的锁定值（方案 2）时，在基坑开挖完成后 6 排锚索均充分受力，但需特别留意的是，第 1、2 排锚索的最终拉力值均明显超过了 450 kN，在本模拟中，锚索的极限锚固力要远大于 450 kN，因而锚索并未失效。而在实际工程中，锚索拉力值过大会降低基坑支护的安全储备，严重超出甚至会造成锚固失效，进而引发工程事故。在方案 3 中，考虑支护桩的变形特征，对不同位置的锚索取不同的锁定值，在基坑开挖完成后，各排锚索的受力较为均匀，且偏离标准值的幅度较小，锚索的受力更为合理。

3 种锁定方案下支护桩的最终侧向变形对比如图 8 所示。

由于方案 1 的初始锁定值偏小，使得 6 排锚索的最终锚拉力值均小于 450 kN，因此，支护桩的侧向变形也明显大于方案 2、3；对比方案 2 与方案 3，由于方案 2 中各排锚索的拉力值均大于方案 3，因

此,在方案2中的桩身整体侧向变形要小于方案3,但两者的差异幅度较小,虽然方案2对桩身约束作用更强,但由前述分析可知,这是以降低上排锚索支护的安全储备为代价的。总体而言,方案3中各排锚索受力更为合理,支护桩侧向变形也得到较好的约束,相比而言是最优的张拉锁定方案。

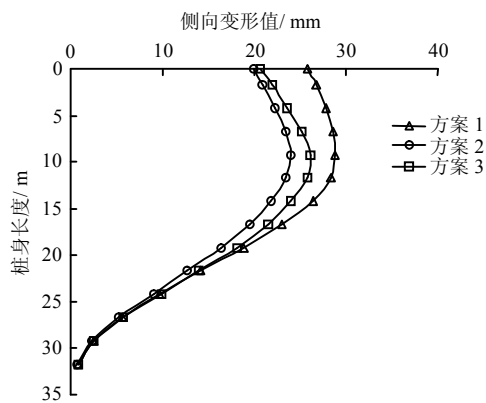


图8 不同锁定方案下支护桩的侧向变形
Fig.8 Lateral deformation of supporting piles under different locking schemes

5 讨论

在本文对比分析拉力型、压力型锚索的锚头刚度差异时,仅考虑了钢绞线对锚头刚度的贡献,而忽略了锚固段的影响。事实上,锚索的锚头刚度大小与钢绞线长度、锚固段长度、锚固体与岩土体之间的黏结强度以及锚索腰梁(或冠梁)的挠度均有关系,由于是对比分析,忽略上述因素中的后两个因素对分析结果影响不大,但对于拉力型锚索而言,忽略锚固段长度对锚头刚度的贡献会对分析产生一定程度的影响。

参考《建筑基坑支护技术规程》^[6]中按经验计算弹性支点刚度系数 k_R 的公式(4.1.9-2):

$$k_R = \frac{3E_s E_c A_p A b_a}{(3E_c A l_f + E_s A_p l_a)s} \quad (14)$$

式中: E_s 为锚杆杆体的弹性模量(kPa); E_c 为锚杆的复合弹性模量(kPa); A_p 为锚杆杆体的截面面积(m^2); A' 为锚杆固结体的截面面积(m^2); E_m 为锚杆固结体的弹性模量(kPa); b_a 为结构计算宽度(m); s 为锚杆水平间距(m)。

当拉力型锚索承受轴向荷载时,设自由段钢绞线的刚度为 k_1 ,锚固段的刚度为 k_2 ,由式(5)可知:

$$k_1 = \frac{E_s A_p}{l_f}, k_2 = \frac{E_c A}{l - l_f} \quad (15)$$

在一般情况下 b_a 与 s 是相等的,将式(15)代入式(14),则可将式(14)改写为

$$k_R = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{3k_2}} \quad (16)$$

在本文对拉力型锚索的分析中,只考虑了 k_1 对锚头刚度的贡献,即相当于忽略了式(16)分母中的 $1/(3k_2)$ 项。因此,在实际工程中,拉力型锚索的真实锚头刚度值要略小于本文中的计算值。而忽略锚固段带来的计算误差体现在对比分析中,即表现为两类锚索的锚头刚度差异相应减小,这对实际工程的影响是偏于安全的。

6 结论

从最终目的而言,合理的初始张拉锁定值应使得锚索在基坑开挖完成后达到或接近设计标准值,并能在开挖过程中控制支护结构的变形发展。基坑规范给出了锁定值的取值范围,而锁定值的取值与基坑开挖完成后锚索的锚头位移及锚索自身结构直接相关。基于此,本文考虑了拉力型、压力型、荷载分散型锚索自身结构特点以及多排锚索锚拉桩上锚索张拉顺序对锚索锁定值取值的影响,主要得到以下结论:

(1) 当锚索的自由段、锚固段长度相同时,由于压力型锚索的钢绞线全长无黏结,在初始锁定后锚头的刚度小于拉力型锚索。因此,拉力型锚索在锁定时应采取较小的锁定值,即可取规范规定范围的小值,而压力型锚索在初始锁定时可取规范规定范围的大值。

(2) 由于分散型锚索各组钢绞线长度不等,在初始锁定后由相等锚头位移产生的附加拉力值必然不等,因此,应对各组钢绞线分别施加不同的初始预加力。各分段承载体锚索的锁定值与锚头的最终位移、锚索自由段长度、锚固体分段长度及锚固体位置有关,且离孔口距离越远,分段承载体锚索的锁定值越大。

(3) 当支护桩上存在多排锚索时,由于各排锚索的张拉顺序不同,对应的锚头真实位移差异较大,为使各排锚索在基坑开挖完成后受力均匀,在选择初始锁定值时,应对上排锚索选用相对较小的锁定值,而对下排锚索选用相对较大的锁定值,而这种相对大小的程度应结合各排锚索在张拉锁定后发生的真实锚头位移大小来确定。

参 考 文 献

- [1] 程良奎, 张培文, 王帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668—682.
CHENG Liang-kui, ZHANG Pei-wen, WANG Fan. Several mechanical concepts for anchored structures in rock and soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(4): 668—682.
- [2] 郭院成, 王新玲, 吕伟. 单支点桩锚结构中锚杆预应力锁定值的反演分析[J]. 工业建筑, 2002, 32(9): 46—47, 61.
GUO Yuan-cheng, WANG Xin-ling, LÜ Wei. The inversion analysis of anchor bar prestressing degree in deep excavation supporting structure of row of piles[J]. **Industrial Construction**, 2002, 32(9): 46—47, 61.
- [3] 张兴昌, 夏锦红. 锚杆预应力锁定值影响因素的分析模型与算例分析[J]. 建筑技术, 2008, 39(9): 726—728.
ZHANG Xing-chang, XIA Jin-hong. Analysis model and calculation on influence factors of inherent stress value[J]. **Architecture Technology**, 2008, 39(9): 726—728.
- [4] 王宪章, 杨志银, 姜晓光, 等. 压力分散型锚索锚固锁定预加拉力值的探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1320—1322.
WANG Xian-zhang, YANG Zhi-yin, JIANG Xiao-guang, et al. Study on locked pretension of pressure-dispersive anchors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(7): 1320—1322.
- [5] 张亮, 廖小平. 锚索抗滑桩设计拉力及锁定值的规划求解研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 38—45.
ZHANG Liang, LIAO Xiao-ping. Study on tensile force and its locked value of pre-stressed anchor cables designed for piles by programming solver of Excel[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2010, 37(5): 38—45.
- [6] 中国建筑科学研究院. 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.
China Academy of Building Research. JGJ120-2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Build Press, 2012.
- [7] 重庆市设计院. GB50330-2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Chongqing Architectural Design Institute. GB50330-2013 Technical code for building slope engineering[S]. Beijing: China Architecture and Build Press, 2013.
- [8] 中国建筑科学研究院. GB50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China Academy of Building Research. GB50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Build Press, 2011.
- [9] 中冶建筑研究总院有限公司. GB50086-2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
China Metallurgy Architecture Research Institute Co., Ltd. GB50086-2015 Technical code for engineering of ground anchoring and shotcrete support[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [10] 深圳钜联锚杆技术有限公司. JGJ/T282-2012 高压喷射扩大头锚杆技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Shenzhen Julian Anchor Technology Co., Ltd. JGJ/T282-2012 Technical specification for under-reamed anchor by jet grouting[S]. Beijing: China Architecture and Build Press, 2012.
- [11] 冶建筑研究总院有限公司. CECS22-2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
China Metallurgy Architecture Research Institute Co., Ltd. CECS22-2005 Technical specification for ground anchor[S]. Beijing: China Planning Press, 2005.
- [12] 中南勘察设计院(湖北)有限责任公司. DB42/T159-2012 基坑工程技术规程[S]. 武汉: 湖北省建设工程标准定额管理总站, 2012.
Zhongnan Survey and Design Institute (Hubei) Co., Ltd. DB42/T159-2012 Technical specification for excavation engineering[S]. Wuhan: The Local Standards of Hubei Province, 2012.
- [13] 济南大学. GB50497-2009 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
University of Jinan. GB50497-2009 Technical code for monitoring of building excavation engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [14] 时伟, 刘继明, 章伟. 深基坑桩锚支护体系水平位移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 1): 2355—2358.
SHI Wei, LIU Ji-ming, ZHANG Wei. Testing study on horizontal displacement of anchor-pile bracing structure for deep foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.1): 2355—

2358.

- [15] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[J]. **Geotechnical Special Publication**, 2002, 118: 2177—2208.
- [16] 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.
- [17] 刘新荣, 刘永权, 康景文, 等. 基坑锚索预应力损失规律及分步张拉控制措施研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 35(10): 1794—1801.
LIU Xin-rong, LIU Yong-quan, KANG Jing-wen, et al. The prestress loss law of anchor cable in foundation pit and the control measure of tension by steps[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 35(10): 1794—1801.
-
- 上接第 2163 页
- [29] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
WU Jia-long. Elasticity[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003.
- [30] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
XU Zhi-lun. Elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [31] 重庆市设计院. GB 50330-2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Chongqing Architectural Design Institute of China. GB 50330-2013 Technical code for building slope engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [32] 董燕君. 岩土预应力锚索荷载传递规律及其设计方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
DONG Yan-jun. Load transfer law of geotechnical prestressed anchorage cable and its design method[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [33] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 696—699.
JIANG Zhong-xin. A Gauss curve model on shear stress along anchoring section of anchoring rope of extensional force type[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(6): 696—699.
- [34] 黄求顺, 张四平, 胡岱文. 边坡工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
HUANG Qiu-shun, ZHANG Si-ping, HU Dai-wen. Slope engineering[M]. Chongqing: Chongqing Univeristy Press, 2003.
- [35] 吴曙光, 张永兴, 康明. 压力型和拉力型锚杆工作性能对比研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, (5): 45—49.
WU Shu-guang, ZHANG Yong-xing, KANG Ming. An analysis of working performance of pressure-type and tensile-type anchor[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2008, (5): 45—49.
- [36] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 251—256.
CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Model test study on the change of anchor cable tension tonnage with time in soft rock reinforcement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 251—256.
- [37] 谭俊, 李巨龙, 徐梅, 等. 小湾工程边坡中的锚索试验研究[J]. 广东水利水电, 2009, (3): 34—36.
TAN Jun, LI Ju-long, XU Mei, et al. Experimental study on anchor cable in slope of Xiaowan Project[J]. **Guangdong Water Resources and Hydropower**, 2009, (3): 34—36.