

压力分散型预应力锚索张拉施工工艺研究

张海生 李锦云

(冶金部勘察研究总院 河北 保定 071069)

摘要: 压力分散型预应力锚索由于单元间长度不同,在相同张拉力条件下各单元的应力状态存在差异,另外受挤压区岩体变形(锚头位移)和张拉设备等因素的影响,相对于拉力型锚索各锚索单元也易产生应力差异,当差异较大时,易造成个别单元应力超限或破坏,影响锚固效率和加固体安全。因此,施工中结合边坡岩体特性和张拉设备条件探讨科学的张拉工艺是压力分散型预应力锚索施工中的重要环节。文章以山东省某高速公路压力分散型锚索张拉施工为实例,通过对压力分散型锚索几种张拉方法的单元受力状态分析和同一三高速公路山东青岛段K14+600-950边坡工程检验成果,提出了压力分散型锚索先差异荷载张拉后超荷载张拉的两序张拉工艺方法。为类似工程提供一定借鉴经验。

关键词: 压力分散型锚索 差异荷载张拉 受力分析 两序张拉工艺

1. 前言

近年来,压力分散型预应力锚索由于其锚固段压力分散合理,锚固力大,采用的无粘结钢绞线防腐效果好,施工简便,节约材料等优点,在复杂高边坡加固中应用越来越广泛,逐渐取代拉力型锚索,但该类锚索预应力张拉施工时,因受单元锚索弹性变形量差异、挤压区岩体变形(锚头位移)和张拉设备等因素的影响,相对于拉力型锚索各锚索单元易产生受力差异,当差异较大时,易造成个别单元应力超限或破坏,影响锚固效率,因此,施工中结合边坡岩体和设备条件探讨科学的张拉工艺是压力分散型预应力锚索实施的重要环节。本文以山东省某高速公路压力分散型锚索张拉施工为例,分析了压力分散型锚索几种张拉方法的单元受力状态和合理张拉工艺的选择原则。

2. 工程概况

同一三高速公路山东青岛段K14+600-950边坡最大高度为50m,岩性为中风化花岗岩,构造

条件复杂,设计采用预应力值为750kN的压力分散型预应力锚索加固,锚索采用6根 $\phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线,强度等级为1860MPa。因冬季施工采用了60cmx60cm钢结构锚墩,锚索分9排布设,长度为21m和33m,分3个单元,单元长度差为4m,设计张拉力750kN,详见图1。

3. 预应力基本原理

理论伸长值计算公式: $\Delta L = F_j \cdot L / (E_s \cdot A_p)$

式中: ΔL —理论伸长值(mm);

F_j —张拉力(kN);

L —钢绞线张拉长度(mm);

A_p —钢绞线总受力面积(mm^2);

E_s —钢绞线弹性模量(N/mm^2)。

4. 张拉工艺

压力分散型锚索各单元受力应相等,施工中必须先对各单元锚索分别张拉,当各单元锚索在同等条件下因自由段长度不等引起的弹性伸长值差得到补偿后,方可同时张拉各单元锚索^[1]。根据上述要求,张拉施工前需进行理论验

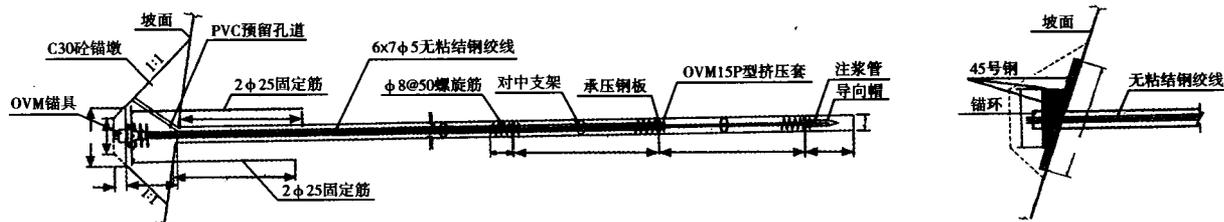


图1 压力分散型锚索结构简图

算确定张拉方案,并通过试验确定合理的张拉施工工艺。

4.1 理论验算

压力分散型锚索张拉按张拉形式可分为单元张拉、整体张拉和先单元张拉后整体张拉3种,其中单元张拉因不能直接验证总体张拉力且施工速度慢、工序较复杂,一般不被采用。本次只研究后两种方法。先单元张拉后整体张拉法按单元张拉荷载的不同,又可分为等荷张拉和差异荷载张拉两种。在先单元张拉后整体张拉时,还应考虑有边坡变形影响的张拉方法。

4.1.1 整体张拉法各单元应力条件

整体张拉时下列条件成立:

(1) 每根锚索的伸长值相同: $\Delta = \Delta_A = \Delta_B = \Delta_C$; 即总应变相同;

(2) 总拉力 $F = F_A + F_B + F_C$

$\Delta_A = (F_A \cdot L_A) / (E_s \cdot A_p)$; $F_A = F / (1 + L_A/L_C + L_A/L_B)$

$\Delta_B = (F_B \cdot L_B) / (E_s \cdot A_p)$; $F_B = F_B \cdot L_A/L_B$

$\Delta_C = (F_C \cdot L_C) / (E_s \cdot A_p)$; $F_C = F_A \cdot L_A/L_C$

式中: $\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C$ —单元A, B, C理论伸长值;

F_A, F_B, F_C —单元A, B, C张拉荷载;

L_A, L_B, L_C —单元A, B, C有效张拉长度;

F—总荷载。

[例1]钢绞线弹性模量为180kN/mm²,单根截面积139mm²,单元截面积为2×139=278mm²。张拉荷载为825kN,锚索孔深为21m和32m,整体张拉的理论计算结果见表1。

4.1.2 先单元等荷载张拉后超荷整体张拉法各单元应力条件

先单元等荷张拉后整体张拉单元应力理论计算结果表

表2

锚索长度 (m)	单元	张拉长度 (m)	一序等设计荷载单元张拉				二序超荷载总体张拉(设计荷载110%)				
			截面积 (mm ²)	张拉力 (kN)	张拉顺序	理论伸长值 (mm)	截面积 (mm ²)	单元拉力 (kN)	差异率(%)	理论增量 (mm)	总拉力 (kN)
20	A	20	278	250	3	102.42	834	269.3	4.59	7.92	825
	B	16	278	250	2	82.43		274.0			
	C	12	278	250	1	62.45		281.7			
32	A	32	278	250	3	162.37	834	271.6	2.6	14.05	825
	B	28	278	250	2	142.39		274.7			
	C	24	278	250	1	122.40		278.7			

整体张拉单元应力理论计算结果表 表1

锚索长度 (m)	总张拉力 (kN)	单元A		单元B		单元C		单元拉力最大差异率 (%)
		L _A	F _A	L _B	F _B	L _C	F _C	
20	825	20	210.64	16	263.30	12	351.06	66.66
32	825	32	237.33	28	271.23	24	216.44	33.33

[例1]理论计算结果见表2。

4.1.3 先单元差异荷载张拉后超荷整体张拉法各单元应力条件

单从理论考虑,通过先差异张拉可实现整体张拉的完全相同,依据如下:

$$F_A = F_B = F_C \quad (1)$$

$$F_A + F_B + F_C = F \quad (2)$$

$$\Delta = \Delta_A = \Delta_B = \Delta_C \quad (3)$$

$$\Delta_A = (L_A \cdot F_A) / (E_s \cdot A_p) \quad (4)$$

通过(1)~(4)式换算,即 $F_A = (1 - L_C/L_A) F/3 + F_C L_C/L_A$ (5)

式(5)中给出其中单元拉力为定值,即可算出整体张拉各单元拉力相等的另两各单元的初始拉力。

[例2] $L_A = 20\text{m}$, $L_B = 16\text{m}$, $L_C = 12\text{m}$, $F_0 = 825\text{kN}$, $F_C = 250\text{kN}$;

由式(5)得 $F_A = 260\text{kN}$, $F_B = 256.3\text{kN}$ 。

[例2]理论计算结果见表3。

4.1.4 挤压区有变形的先单元后超荷整体张拉法各单元应力条件

张拉施工中边坡在应力作用下,产生弹性变形和塑性变形,前者一般较小,可忽略,主要为后者,塑性变形根据产生的阶段划分为两种:①单元张拉变形,②整体超张拉变形。

单元张拉变形理论分析:当差异张拉过程中产生边坡位移时,一序张拉单元产生位移

先单元差异荷载张拉后超荷整体张拉各单元应力理论计算结果表

表3

锚索长度 (m)	单元	张拉长度 (m)	一序等设计荷载单元张拉				二序超荷载总体张拉(设计荷载110%)				
			截面积 (mm ²)	张拉力 (kN)	张拉顺序	理论伸长值 (mm)	截面积 (mm ²)	单元拉力 (kN)	差异率(%)	理论增量 (mm)	总拉力 (kN)
20	A	20	278	260	3	103.92	834	275	4.59	5.99	825
	B	16	278	256.3	2	81.95					
	C	12	278	250	1	59.95					
32	A	32	278	256.25	3	163.87	834	275	2.6	11.99	825
	B	28	278	253.57	2	141.8					
	C	24	278	250	1	119.90					

S_{01} 一般较小,另两个单元未锁定,因此对单元拉力影响较小,可忽略;第2单元,第3单元张拉产生的边坡位移 S_{12} 和 S_{23} 对第1、2单元将产生影响,如张拉顺序为 $C \rightarrow B \rightarrow A$ (短 \rightarrow 中 \rightarrow 长),其各单元差异荷载张拉坡面变形后的拉力为:

$$F_C = F_{C0} + E_s \cdot A_p (S_{12} + S_{23}) \quad (6)$$

$$F_B = F_{B0} + E_s \cdot A_p (S_{23}) / L_B \quad (7)$$

$$F_A = F_{A0} \quad (8)$$

式中 F_{A0} , F_{B0} , F_{C0} —A, B, C单元初始拉力;

S_{01} , S_{12} , S_{23} —一序,二序和三序张拉挤压区产生的变形值。

根据4.1.3式(1)~(4)可确定 F_{A0} , F_{B0} , F_{C0} 值;如试验确定 S_{12} ,和 S_{23} 值,据式(6)~(8)确定单元差异荷载。[例2] $S_{12}=5$ mm, $S_{23}=5$ mm时,理论计算结果见表4。

整体张拉变形,整体张拉产生的边坡位移可视为有效张拉长度的减小,计算原理与3.13基本相同,[例2] $S=5$ 、10、20mm时,[例2] $S=-5$ 、-10mm时,理论计算结果见表5。

4.1.5 边坡有向前位移时先单元后超荷整体张拉法各单元应力条件

在实践中还经常出现由于设防水平不足或其它原因导致边坡下滑力加大,这就导致边坡产生向前变形情形。[例2]坡体有向前变形 $S=5$ 、10 mm时,理论计算结果见表6。

4.2 张拉工艺选择

根据表1-5数据,张拉施工直接采用整体张拉法,各单元的理论应力最大差异为66.6%;采用先单元等荷载张拉后超荷整体张拉法,各单元的理论应力最大差异为4.59%;先单元差异荷载张拉后超荷整体张拉法,各单元的理论拉力最大差异率为0%。考虑挤压区一定数量变形,按 $C \rightarrow B \rightarrow A$ (短 \rightarrow 中 \rightarrow 长)顺序,荷载 $F_{A0} > F_{B0} > F_{C0}$,单元张拉后超荷整体张拉法的最大差异为0.00%;差异荷载不变张拉顺序改变时;总体超荷张拉后单元间拉力差异率为0.00%。先按 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 顺序,荷载 $F_{A0} < F_{B0} < F_{C0}$,单元差异荷载张拉后超荷整体张拉,最大差异为7.56%;边坡有向前位移时,先按 $C \rightarrow B \rightarrow A$ 顺序,单元差异荷载张拉后超荷整体张拉,当变形为10mm时,最大差异为6.50%; $A \rightarrow B \rightarrow C$ 顺序,单元差异荷载张拉后超荷整体张拉,当变形小于10mm时,最大差异为13.11%。

挤压区有变形时单元差异张拉各单元应力理论计算结果表

表4

锚索长度 (m)	单元	张拉 长度	截面积 (mm ²)	单元初始 拉力 (kN)	张拉顺序	理论伸长值 (mm)	单元压缩 变形 (kN)	单元拉力 (kN)	截面积 (mm ²)	整体压缩 变形 (kN)	差异率 (%)	理论 增量 (mm)	总拉力 (kN)
20	A	20	278	260	3	103.92	0	260	834	0	0.00	5.99	825
	B	16	278	271.94	2	81.95	5	256.3					
	C	12	278	291.70	1	59.95	10	250					
	A	20	278	285	1	99.92	10	250					
	B	16	278	271.94	2	81.95	5	256.3					
	C	12	278	250	3	62.35	0	260					

挤压区有变形时先单元后超荷整体张拉各单元应力理论计算结果表

表5

锚索长度 (m)	单元	张拉长度 (m)	差异荷载单元张拉					超荷总体张拉 (设计荷载110%)						
			截面积 (mm ²)	单元初始 拉力 (kN)	张拉 顺序	理论伸 长值 (mm)	单元压缩 变形 (mm)	单元拉力 (kN)	截面积 (mm ²)	整体 变形 S (mm)	单元拉力 (kN)	差异率 (%)	理论增量 (mm)	总拉力 (kN)
20	A	20	278	260	3	103.92	0	260			275			
	B	16	278	256.3	2	81.95	0	256.3	834	5	275	0.00	5.96	825
	C	12	278	250	1	59.95	0	250			275			
	A	20	278	260	3	103.92	0	260			275			
	B	16	278	256.3	2	81.95	0	256.3	834	20	275	0.00	25.88	825
	C	12	278	250	1	59.95	0	250			275			
	A	20	278	250	3	99.92	0	250			265			
	B	16	278	256.3	2	81.95	0	256.3	834	5	275	0.00	10.96	825
	C	12	278	260	2	62.35	0	260			285			
	A	20	278	250	3	99.92	0	250			265			
	B	16	278	256.3	2	81.95	0	256.3	834		275	0.00	25.88	825
	C	12	278	260	1	62.35	0	260			285			

边坡有向前位移时先单元后整体张拉单元应力理论计算结果表

表6

锚索长度 (m)	单元	张拉长度 (m)	单元拉力 (kN)	坡体有一定向前位移				
				截面积 (mm ²)	先前变形 (mm)	单元拉力 (kN)	差异率 (%)	总拉力 (kN)
20	A	20	260			292.2		
	B	16	256.3	834	5	296.6	1.49	874
	C	12	250			303.7		
	A	20	260			304.7		
	B	16	256.3	834	10	312.2	6.50	923
	C	12	250			324.5		
	A	20	250			280.0		
	B	16	256.3	834	5	293.8	10.7	873
	C	12	250			310.0		
	A	20	260			292.5		
	B	16	256.3	834	10	309.4	13.1	922
	C	12	250			330.8		

根据张拉后单元受力相同的原则,整体张拉单元差值太大,不宜采用;先单元等荷载张拉后超荷整体张拉法,单元间也存在差异,不宜采用。先单元差异荷载张拉后超荷整体张拉法,在挤压区有无变形时均可实现张拉后单元受力均衡,因此是合理的。单元差异张拉的单元张拉荷载与张拉长度、整体张拉荷载和边坡变形量相关,差异张拉的荷载应满足 $F_{A0} > F_{B0} > F_{C0}$, C→B→A(短→中→长)。该方法中差异荷载与张拉长度不匹配时,也会引起单元受力不均衡,施工中应注意。

当张拉完成后边坡有向后的塑性变形或向前位移时,单元受力均衡都将被破坏,前者造成单元拉力减小(即松弛),施工中应根据边

坡变形试验资料确定超张拉幅度,补偿可能产生的应力损失或改变锚头尺寸减小塑性变形;后者单元拉力将加大,位移过大时应增加预应力值或增加锚固工程量,防止单元拉力超限。

4.3 张拉施工工艺

依据计算结果并结合张拉设备特点,施工中采用了先分单元差异荷载张拉后总体超荷张拉法。具体为:21m锚索一序按单元实施设计荷载的25%,50%,75%和100%(最短),102.5%(次长)和104%(最长)差异张拉,每级加载后持荷2~3min,单元间张拉顺序为短→中→长;二序总体张拉至设计荷载110%,即825kN,持荷3~5min,当无明显预应力衰减时,实测伸长值并记录;且与理论伸长值比较、锁

定。施工中采用的张拉设备是YCW-150千斤顶，油泵型号为ZB-500。

5. 张拉检验

张拉施工完成21d后，对3组锚索进行了检验，结果见表7。由此可以看出，锁定后单元应力有所减小，主要是边坡塑性变形引起的，总荷载大于设计荷载，单元荷载差异率最大仅为1.61%，变化不大，满足要求。

锚索完成后张拉检验成果表 表7

锚索编号	单元	锚索长度 (m)	索定荷载 (kN)	实测拉力 (kN)	锚头位移 (mm)	最大差异率 (%)
A	A	32	275	262.3	8.1	1.61
	B	28	275	260.5		
	C		275	258.1		
A+B+C	A+B+C	24	275	781.0	4.0	0.78
	A	32	275	268.7		
	B	28	275	267.8		
B	B	28	275	267.8	3.0	0.66
	C	24	275	266.7		
	A+B+C		825	803.3		
C	A	20	275	267.5	3.0	0.66
	B	16	275	265.5		
	C	12	275	262.5		
A+B+C	A+B+C		825	795.7		

6. 结语

6.1 压力分散型预应力锚索张拉施工时不能采用直接整体张拉。

(上接第11页)

1.07mm，表2、表4两测点的平均位移为0.68mm，二者的计算值分别为0.95mm和0.85mm。实测值与计算值较为接近。电子百分表2、表4监测模型索孔出口面的位移，测试结果表明模型在该点处向外凸出；表1、表3监测模型侧壁的位移，测试结果表明模型在该测点处向内凹进。顶推至1.5P时，两个侧面位移达到最大值，分别达到-1.10mm和1.85mm。

4. 结论

(1) 模型的应力测试结果与用有限元分析计算程序计算的结果基本一致。应力及变形试验结果表明，在大小为6089kN (1.0P) 的顶推荷载作用下，模型结构基本处于弹性工作状态下；

(2) 试验模型的开裂荷载为7915kN (1.3P)，模型的破坏荷载大于9133kN (1.5P)，该索塔锚固区具有足够的安全度。

6.2 张拉前应通过试验并结合岩体条件、锚墩尺寸、单元张拉长度、单元张拉顺序、差异荷载与张拉长度匹配关系和张拉设备等因素，综合计算确定张拉工艺和参数。

6.3 先差异荷载张拉后超荷张拉的两序法是合理工艺，可保障单元间张拉后的受力均衡，一序差异荷载张拉长度长的单元应高于张拉长度短的单元，即： $F_{A0} > F_{B0} > F_{C0}$ ，不宜采用 $F_{A0} < F_{B0} < F_{C0}$ ；张拉顺序应从单元张拉长度短的开始C→B→A，不宜采用A→B→C。二序整体超张拉目的是防止应力损失，超荷幅度应小于设计荷载的15%。

6.4 张拉产生的坡体变形对单元拉力均衡影响较大，当该值较大时，应调整张拉参数或改变锚头尺寸，以减小单元受力差异和总应力损失。

参考文献

- [1] GB 50086-2001, 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].
- [2] 梁炯璧. 岩土工程技术与概念发展[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 1998.

(3) 在模型的两个索孔出口面均出现了裂缝，裂缝出现的部位和总体走势都非常相近。加载至第11级荷载 (1.5P) 时，两个索孔出口面裂缝的最大宽度大约分别为0.08mm和0.06mm。

参考文献

- [1] 李海光, 奚伟. 上海杨浦大桥主塔拉索锚固区的环向预应力工艺试验研究. [J]. 建筑施工, 1993.5, Vol.15: 1-4.
- [2] 卓卫东, 房贞政. 预应力混凝土桥塔斜索锚固区空间应力分析. [J] 同济大学学报 (自然科学版), 1999.4, Vol.27.No.2: 203-206.
- [3] 李兴华, 安群慧, 王戒躁. 芜湖长江大桥索塔锚固区模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(5): 103-106.
- [4] 陈建阳, 徐国平, 刘丽等. 大吨位小半径环向预应力在斜拉桥索塔锚固区中的应用研究[J]. 桥梁建设, 2001(2): 12-15.