

斜拉桥索鞍的抗滑键基于超张负摩阻锁紧的作用原理及施工工艺研究

黄锦源

(上海市城市建设设计研究总院 上海 200125)

摘要:斜拉桥中采用塔上鞍座锚固的钢绞线拉索在金属分丝管道内受到摩阻效应的影响而具有抗滑锚固性能。分析斜拉索钢绞线单侧布置抗滑键进行锁定、抗滑键双向交叉布置的型式实现拉索整体抗滑锚固构造的传力机理,同时提出斜拉索基于超张负摩阻锁紧抗滑键的作用原理及施工工艺。且考虑到有个别分丝管在施工中难免会变形或堵塞,造成钢绞线不能穿孔而形成质量事故,有必要采取措施防止。在原有的分丝管中增加备用管道是比较简单的有效方法,也可作为今后桥梁加固所需的备用管道。

关键词:斜拉索 鞍座 负摩阻 抗滑键 备用管道

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.04.006

1 研究背景

斜拉桥的拉索在上塔柱采用分丝管鞍座的机械抗滑锚固,将钢绞线单侧布置抗滑键进行单向锁定、抗滑键双向交叉布置的型式实现拉索整体抗滑锚固(见图1),其构造简单且可实现单根钢绞线的更换,耐久性能良好,克服以往锚固筒构造的缺点,应用越来越广。

为将抗滑键顶紧鞍座,需在背侧预加一定的超张束力,由于单侧布置抗滑键因此一根钢绞线两个方向束力是不同的。当拉索受不平衡力作用时,索力先由鞍座内摩擦力平衡,如无法达到平衡,需依靠抗滑键处承受挤压力才能达到平衡。单侧布置抗滑键进行单向锁定,背侧有抗滑键与无抗滑键的束力是不同的,同索内每根钢绞线束力不均匀会影响拉索的整体安全度。同索的不同应力不能用常规的振弦法测试索力,给索力的测试带来困难。

为克服单侧布置抗滑键束力不均匀的问题,经研究可利用拉索在鞍座内存储反摩阻作用,以

最大限度地避免抗滑装置被拉出并保证拉索中的钢绞线受力均匀。

每根索张拉之前实测单根钢绞线摩阻值,计算被动(固定)端索力 $P_{固}$ 与张拉端的索力 $P_{张}$ 比值得张拉效率系数 $K = e^{-\mu\theta}$,见式(1)。

$$K = P_{固}/P_{张} = e^{-\mu\theta} \quad (1)$$

无抗滑键端先张拉,其张拉力需大于实测摩阻力,以保证抗滑键顶紧索鞍端面。有抗滑键端张拉时,无抗滑键端也同时张拉,张拉过程中始终保持无抗滑键端张拉力大于抗滑键端张拉力,其差值为实测摩阻力的1~2倍之间。抗滑键侧拉到目标索力 F_a 时,先锚固,然后将无抗滑键侧加力到计算超张拉力 F_k (见图2中曲线1),再卸载到安装目标索力 F_b 后锚固(见图2中曲线2)。卸载过程中鞍座内作用负摩阻使抗滑键保持压紧索鞍端面。一般两侧安装目标索力相同: $F_a = F_b$,目标索力 F_b 能在抗滑键上产生最大的索鞍端面压紧力储备见式(2)。

$$a = F_b [K / (2K - 1) - 1] \quad (2)$$

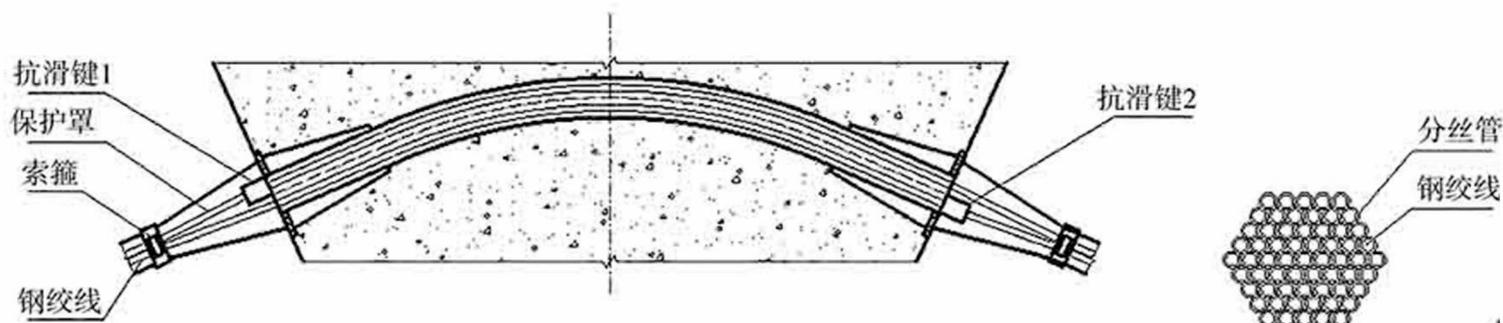


图1 抗滑键构造示意图

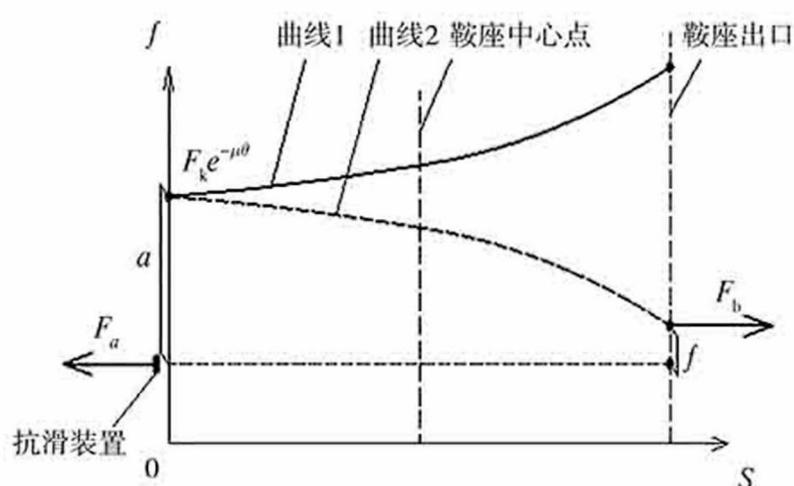


图2 单侧抗滑键超张拉及卸载后鞍座内的索力分布示意图

当抗滑装置在不平衡力作用 $< a$ 值时仍紧贴塔柱, 一般情况下抗滑键侧索力 F_a 不会超越 $F_k e^{-\mu\theta}$ 。而超张拉侧在活载作用下受到正摩阻影响其索力 F_b 也不会超越 $F_k e^{-\mu\theta}$ 。因此, 拉索在鞍座管道内的最大内力为 $F_k e^{-\mu\theta}$, 也即 $F_a + a$, 该值在正常使用过程中是不变的, 因此没有疲劳问题。拉索在实施超张拉时是对单根钢绞线进行操作, 超张拉力不会对结构整体造成过大影响。每个索中各根钢绞线在鞍座管道外束力都是均匀的, 具有相同的安全度。从安全考虑, 当抗滑装置在不平衡力作用 $> a$ 值时, 利用抗滑键后的抗滑插片、锁紧螺母、组成锚固筒 (见图3), 每根钢绞线达到单侧布置抗滑键双侧抗滑的效果。由于已有抗滑键端面压紧力储备 a 值存在, 反向的抗滑力为减掉 a 值后剩余的力, 锁紧螺母、锚固筒反向的抗滑效果更好。

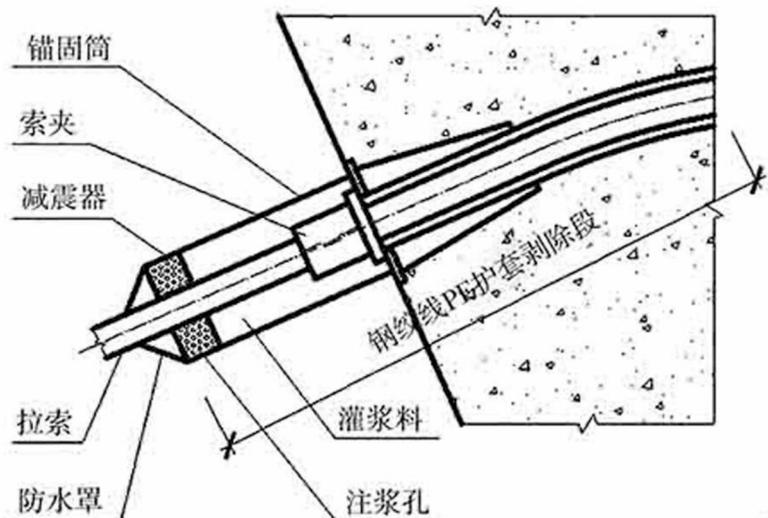


图3 抗滑锚固筒构造示意图

综上所述, 可以归纳索鞍型斜拉索基于超张拉负摩阻锁紧抗滑键的优点如下。

(1) 施工方便, 经济性好, 不增加任何设

备或装置, 保证抗滑键顶紧索鞍端面。

(2) 锁紧力可靠, 拉索在活载作用时利用负摩阻压力储备, 拉索变形小。

(3) 索内每根束力均匀, 提高整根斜拉索的安全度。能用常规的弦振法测试索力。

2 工程实例分析

南昌市朝阳大桥工程通航主跨采用6塔7跨斜拉桥, 每个桥塔共有9对斜拉索, 斜拉索采用强度等级为1860MPa单丝涂覆环氧涂层无粘结预应力钢绞线, 塔上采用分丝管鞍座, 索鞍型号为8种规格, 其中99孔位的拉索规格为目前世界上分丝管鞍座的最大孔位数的拉索体系。在塔上锚固采用分丝管鞍座的机械抗滑装置, 在钢绞线单侧布置抗滑键进行单向锁定、抗滑键双向交叉布置的型式实现拉索整体抗滑锚固, 其构造简单, 且具备单根钢绞线可更换的功能, 克服了锚固筒构造的缺点。钢绞线拉索采用了机械型抗滑装置 (多根钢绞线的抗滑键相对于塔柱中心线交叉布置), 塔柱及鞍座总体构造见图4。

朝阳大桥提出采用单侧超张拉及反向摩阻力锁紧抗滑键的设计原则: 以桥梁永久作用及可变作用引起的最大不平衡力作用为依据, 确定拉索抗滑装置最小压力储备, 保证拉索运营期的最大正应力满足规范及设计要求, 通过限制悬臂施工阶段的最大不平衡重量, 保证拉索在鞍座区的临时抗滑安全性。运营期不平衡荷载采用全桥空间梁单元模型进行加载求解, 悬臂施工期间, 最大容许不平衡重量通过考虑施工全过程的有限元模型基于线性叠加原理求解。

采用文中方法计算拉索在鞍座区的受力状态, 假定摩阻系数 $\mu = 0.06$, 得到表1中的结果。

根据以上结果, 朝阳大桥采用机械型抗滑装置是可行的, 抗滑键压力储备、鞍座区拉索附加应力及伸长量均在合理范围内。实测摩阻系数 $\mu = 0.06 \sim 0.10$, 抗滑键压力储备更大, 更安全。

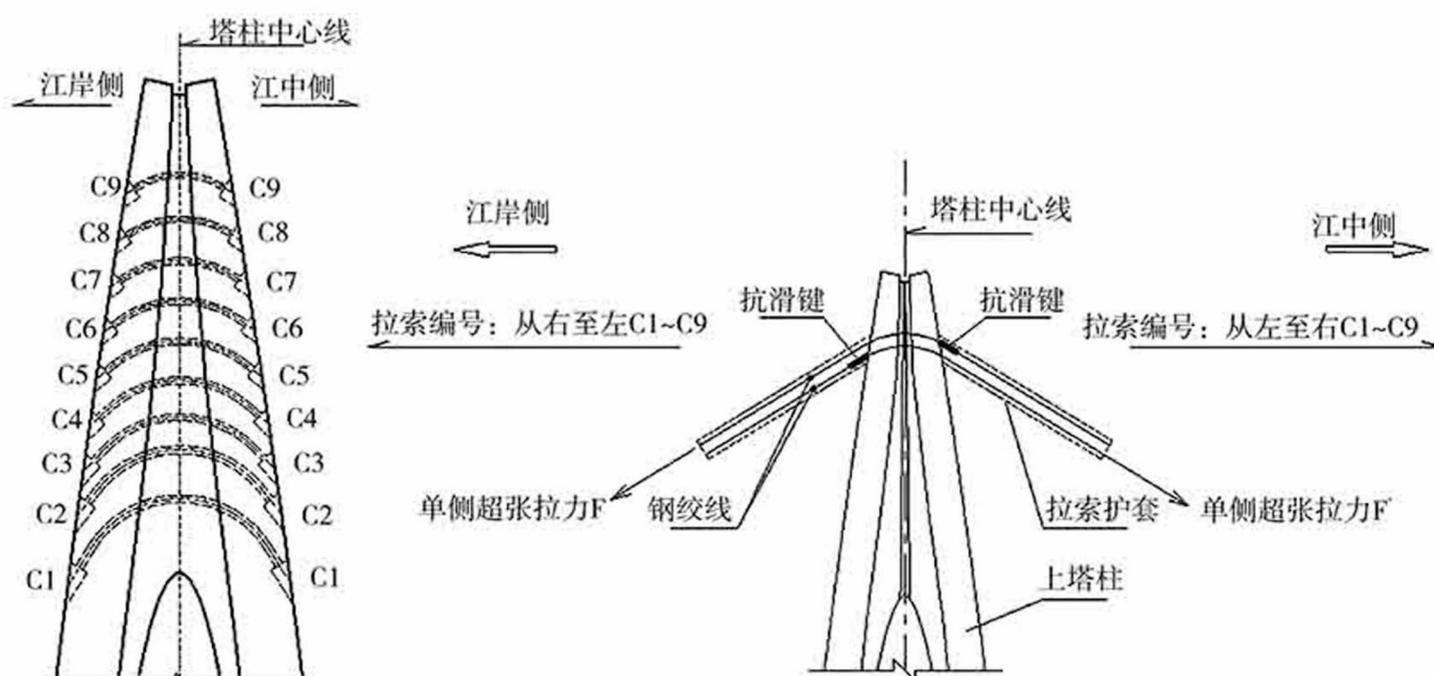


图4 南昌市朝阳大桥工程通航孔桥塔柱及鞍座总体构造示意图

表1 朝阳大桥通航孔桥施工阶段的拉索在鞍座区的受力状态汇总表

拉索编号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
半径R/mm	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 000	3 500
累积转角 $\theta/^\circ$	117.3	104.0	93.1	85.0	78.8	73.9	69.9	66.6	63.9
张拉效率 $e^{-\mu\theta}$	0.88	0.90	0.91	0.91	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93
钢绞线根数	2×52	2×52	2×58	2×61	2×68	2×72	2×79	2×93	2×99
成桥索力/kN	9629	9595	10703	11124	12395	13150	14150	17505	18350
不平衡力/kN	172	172	172	172	172	172	363	363	363
锁紧 压力储备a/kN	578	545	504	490	477	469	463	458	468
抗滑键 附加应力/MPa	80	75	59	52	47	44	42	35	34
计算 超张拉侧伸长量 L_b /mm	27.1	25.9	20.7	18.2	16.6	15.6	15.0	11.3	9.5

3 斜拉索安装施工工艺

3.1 斜拉索安装工艺流程

斜拉索安装工艺流程示意图5。

3.2 抗滑键端面施加负摩阻压力储备，单根钢绞线张拉工艺

(1) 每束索张拉之前实测摩阻系数。将测试钢绞线两端装好千斤顶并配好传感器，一端设为固定端，另一端张拉到施工索力，按式(1)计算固定端与张拉端的索力比值得张拉效率系数 K 。调换方向，将此前的固定端张拉，张拉端固定，反向测出摩阻系数进行校核。每束索选取第一、二根及最后一根钢绞线的实测摩阻系数作记录。按式(3)计算实测索鞍弯道摩阻系数。

$$\mu = -\ln(K) / \theta \quad (3)$$

(2) 按式(4)计算超张拉力。

$$F_k = F_b / (2K - 1) \quad (4)$$

(3) 无抗滑键端先张拉，其张拉力需大于

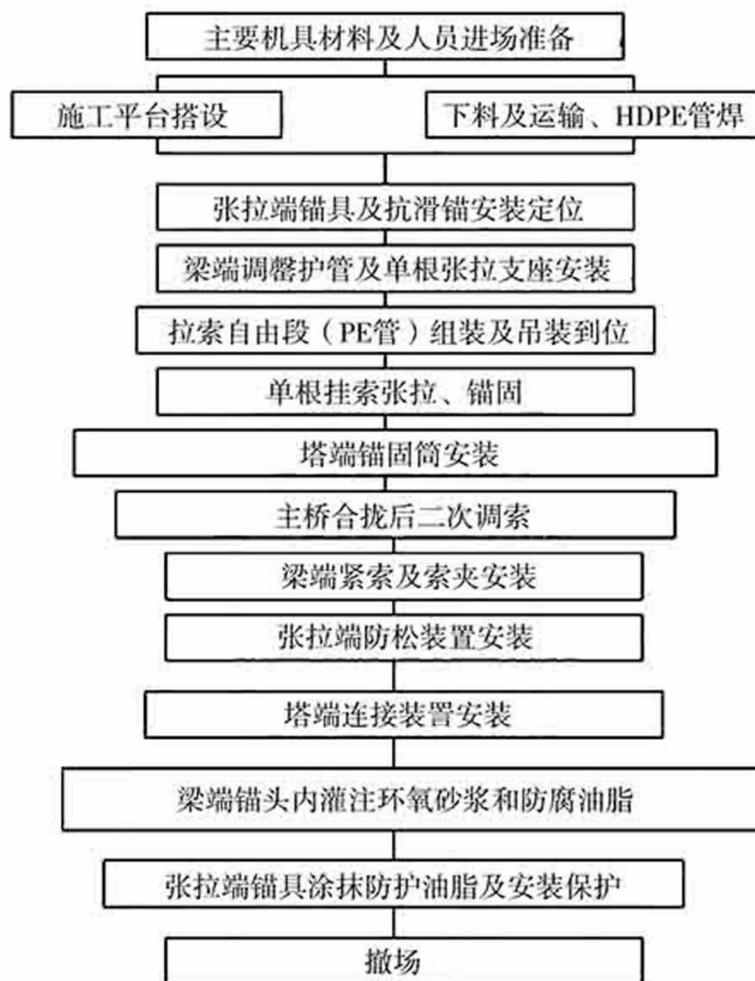


图5 斜拉索安装工艺流程示意图

实测摩阻力，以保证抗滑键顶紧索鞍端面。

(4) 有抗滑键端张拉时，无抗滑键端也同时张拉，张拉过程中始终保持无抗滑键张拉力大于抗滑键端张拉力，其差值为实测摩阻力的1~2倍之间。

(5) 当抗滑键侧拉到监控目标索力 F_a 时，先锚固，然后将无抗滑键侧加力到计算超张拉力 F_k ，再卸载到目标索力 F_b 后锚固。卸载过程中利用负摩阻保持抗滑键压紧索鞍端面。储备在索鞍端面的压紧力可按式(2)求得。

(6) 无抗滑键侧必须在卸载到目标索力 F_b 时锚固，如果卸载过程中低于目标索力，不得简单的加载到目标索力锚固，而必须重新加力到计算超张拉力 F_k ，再卸载到目标索力 F_b 后锚固，才能保证负摩阻将抗滑键压紧索鞍端面。

(7) 工作夹片应一次性锚固，需保证夹片跟进量平整、均匀，避免工作夹片反复锚固遗留下来的不良影响。

(8) 每排钢绞线张拉完成后，安装抗滑插片，整束索张拉完后，安装旋紧锁紧螺母。

(9) 张拉过程中填写斜拉索安装记录表。记录每根钢绞线的张拉要素（张拉油压、张拉力、传感器读数、初值油压、测量初值、测量终值及回缩值等）。

(10) 每根钢绞线张拉完成后在塔上对抗滑键顶紧状态采取实时监控。

(11) 锚头、分丝管上下左右按统一约定位置穿索——对应，穿1根拉1根，张拉后的钢绞线处于绷紧状态，以免发生钢绞线打绞。

3.3 施工精度及索力均匀性控制

为使每根索中各钢绞线索力均匀，采用等张拉值法进行张拉。

(1) 张拉时由施工控制提供施工张拉索力 F_b 。

(2) 斜拉索与水平面的夹角为 α ，将节段预计张拉变形量（升高） Δ ，换算成斜索变形量（缩短），见图6及式(5)。

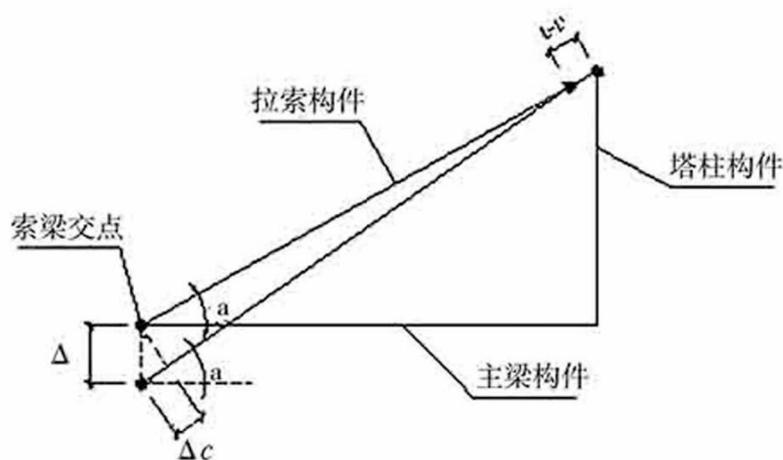


图6 斜拉索变形量示意图

$$\Delta c = \Delta \times \sin \alpha \quad (5)$$

(3) 根据索内钢绞线数量 n ，计算每根钢绞线最终安装张力 $f_b = F_b/n$ ，并假定每根钢绞线张拉变形量见式(6)。

$$\delta c = \Delta c / (n-1) \quad (6)$$

(4) 钢绞线在施工张拉索力作用下的弹性模量为 E_c ，从索鞍到梁的锚固端的长度为 L ，第 i 根钢绞线张拉引起前面钢绞线的应力损失见式(7)。

$$\sigma c = E_c \times \delta c / L \quad (7)$$

(5) 一根钢绞线的面积为 A_c 相应的力为 $\sigma c \times A_c$ 。考虑节段变形损失每根钢绞线的张拉索力调整如下。

$$\text{第一根钢绞线张拉索力 } f_{b1} = f_b + (n-1) \times \sigma c \times A_c$$

$$\text{第二根钢绞线张拉索力 } f_{b2} = f_b + (n-2) \times \sigma c \times A_c$$

.....

$$\text{第 } i \text{ 根钢绞线张拉索力 } f_{bi} = f_b + (n-i) \times \sigma c \times A_c$$

.....

$$\text{第 } n \text{ 根钢绞线张拉索力 } f_{bn} = f_b$$

(6) 每根钢绞线的拉力以控制压力表读数为准，传感器读数进行监测。挂索前，将监测传感器安装在一根不受外界影响的钢绞线上，安装顺序：支座垫板→传感器→单孔工作锚。随后张拉时每根绞线的拉力是按当时传感器的显示变化值进行控制。通过以上索力控制，索力均匀性可控制在每根斜拉索的各股钢绞线的离散误差不大于理论值的 $\pm 2\%$ 。

(下转第32页)

表2 索力测量数据比较

索号	抽样法所测整束索力/kN	全测法所测整束索力/kN	相差比值/%
1	5115.25	5117.9	-0.05
2	4903.43	5002.3	-1.98
3	5112.48	5107.5	0.10
4	4749.88	4886.3	-2.79
5	5021.83	5163.5	-2.74

根据表2的对比结果可知,利用抽样法能够比较准确地计算整束索的索力值。

4 总结

(1) 对于中空钢绞线索的索力测量,只需抽取样本容量所需的钢绞线索力,就可较为准确

(上接第29页)

(7) 张拉完成后,采取单根抽拔或钢绞线做标记测量伸长量两种方式进行复核。单根抽拔就是在张拉完成后对整束索的一部分钢绞线进行抽样抽拔检验,对钢绞线进行复拉,其夹片松动时的力就是这根钢绞线的锚固力。此方法可以准确的检测出每根钢绞线的受力是否均匀。

(8) 当钢绞线处于无应力状态下在两侧锚固点外50mm处做标记,张拉完成后根据标记的所在位置就可以判断出钢绞线的伸长量情况,从而来推断出钢绞线的受力是否均匀。此方法依靠伸长量来准确的判断受力均匀性,对标记的要求精度高,实际厂家下料中每跟钢绞线长度会有一些的误差,做标记亦是如此,较难达到以伸长量来准确的判断出每根张拉力是否均匀。所以仅可作为一种校核手段。

4 对现有的分丝管鞍座的改进

现有出厂的分丝管鞍座分丝管的数量与钢绞线的数量是一致的。在实际施工中,难免在运输、安装、浇注混凝土施工过程中,造成个别分丝管变形或堵塞,使后续的钢绞线穿孔困难,往往在处理事故过程中费时费力,甚至最后由于钢绞线不能穿孔而造成质量事故。因此有必要采取措施,防止由于分丝管变形或堵塞造成质量事故。

比较简单的做法是在原有的分丝管中增加备用管道,在施工过程中如有分丝管变形或堵塞,即可启用备用管道,避免事故的发生。也可以考虑今后桥梁加固所需增加的备用管道数。另外,由于钢绞线采用夹片锚,在调索时只能进不能

地得到整束索的索力值,为该类型索体的索力测量提供了可靠的方法。

(2) 通过概率计算得出的样本容量,最少为4根,最多为钢绞线总数的30%,可以得到置信度为95%的索力测量统计结果。

(3) 该测量方法对于测量人员及施工单位有较高的要求,必须合理施工,保证不破坏原有的防腐、防松设施,并且在测量完成后对其进行有效恢复。

参考文献

- [1] 马恩林. 概率论与数理统计: 理工类[M]. 北京: 人民教育出版社, 2006: 152-213.
- [2] 陈云鹏. 基于频率法的平行钢绞线斜拉索索力测试研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.

退,如果索力偏大需放松时,可增加钢绞线提高安全度。

备用管道的设置一般可取分丝管数量的5%,每个分丝管鞍座至少放一个备用管道,或考虑今后桥梁加固所需增加的备用管道数。位置可放在分丝管所排列的正六边形的空缺位置上。如分丝管已排列成正六边形□备用管道放在正六边形与外切圆的空缺位置上。正六边形的索数 N 可按式(8)或式(9)计算。

$$N = 1 + \sum (n-1) \times 6 \quad (8)$$

$$N = 1 + 3 \times n \times (n-1) \quad (9)$$

式中: n 为正六边形的层数(六边形最外一条边上的钢丝数); Σ 范围为1~ n 。

为防止实际施工中,在运输、安装、浇注混凝土施工过程中,分丝管变形或堵塞,也可采用在分丝管外再加一个钢套管作保护套。

5 结语

南昌市朝阳大桥工程,通航主跨斜拉索在塔内分丝管鞍座锚固,采用超张负摩阻锁紧抗滑键的施工工艺,优化了安装方法,使拉索的索力相同、抗滑键与塔柱密贴且具备足够的压力储备,提高了拉索的安全度,抗滑键锁紧力更加可靠,现场施工方便,取得良好的效果,将分丝管鞍座锚固的施工工艺又推进了一步。

“以抗滑键作为锁定装置的钢绞线拉索的张拉施工方法”已获得发明专利(专利号:201410363165.5),对现有的分丝管鞍座的改进也已获得实用新型专利。