

悬索桥主缆预应力锚固系统设计探讨

苏强 王强 曾诚 卢双桂

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要: 本文分析我国现有悬索桥主缆索股锚固系统的类型、优缺点, 探讨预应力锚固系统在设计、施工中常存在的一些问题并提出建议, 最后展望预应力锚固系统的发展。

关键词: 悬索桥主缆 预应力锚固系统 型钢锚固系统 设计 问题

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2014.05.004

1 前言

悬索桥主缆锚固系统是一种运用于悬索桥、联接主缆索与锚碇台墩、将来自主缆索的荷载传递至锚碇台墩的结构。随着我国交通基础设施建设的不断发展, 桥梁建设已成为我国交通基础设施建设中重要的组成部分, 悬索桥因跨度大、造型美观而成为大型桥梁的首选桥型。主缆锚固系统作为悬索桥主缆索的承载构造, 其设计、建造质量至关重要。

悬索桥锚碇锚固系统主要分为型钢锚固系统和预应力锚固系统两种类型。型钢锚固系统全部由型钢构成, 一般在前锚面或后锚面设置刚度强大的锚梁, 主缆索股与型钢拉杆相对应, 整个锚碇架浇筑在锚块混凝土内。预应力锚固系统则由预应力系统和索股连接件系统构成, 主缆索股通过连接件与预应力筋相连并向锚块传力。

目前我国还没有针对悬索桥主缆锚固系统的

标准或规范。预应力锚固系统锚具的性能主要参照GB/T 14370预应力锚具标准。正因为锚固系统设计不够规范, 导致不同的设计单位有不同的设计倾向和采用不同的设计方法, 出现了一些很值得探讨的问题。本文主要分析比较现有两种类型主缆锚固系统的优缺点, 探讨预应力锚固系统在设计、施工中常存在的一些问题, 提出改进措施或注意事项, 最后展望主缆预应力锚固系统的发展。

2 两种锚固系统的比较

2.1 一些值得商榷的观点与实际应用情况

文献^[1]分析了两种锚固体系的施工难度、经济性、耐久性和安全性, 表1是比较的结果, 从比较结果作者得出了“型钢锚固体系相对预应力锚固体系而言具有很大的优势”的结论。文献^[2]也对两种锚固体系进行了对比分析, 表2是比较的结果, 从比较结果作者得出了“从桥梁全寿命角度考虑, 型钢锚固系统优势较强”的结论。本人认为这些结论是值得商榷的。

表1 型钢锚固体系与预应力锚固体系比较结果1

锚固体系	施工难度	钢材使用量	耐久性	可否修护
型钢锚固体系	施工难度大, 要求精度高	使用量大	良好	不可
预应力锚固体系	难度一般	较小	较好	可以

表2 型钢锚固体系与预应力锚固体系比较结果2

锚固体系	施工难度	换索难度	造价(万元)/万	耐久性	营运投入
型钢锚固体系	锚固钢板用钢量大, 需专业厂家制造, 安装精度要求高	不需要换索	约380	非常可靠	不需要投入
预应力锚固体系	施工难度一般, 较常规	难度一般, 但换索慢	约150	可靠	需要换索、加油吹风

之所以本人认为两篇文献中的结论值得商榷, 是因为实际的情况是: 悬索桥主缆采用预应力锚固

系统的工程远远多于采用型钢锚固系统的工程, 特别在欧美国家, 只有在中国与日本还有部份工程采用型钢锚固系统。表3是我国已建的主跨超800m的部分悬索桥与其主缆锚固系统类型^[3]。

摘自: 2013年第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会

表3 我国主跨超800m的部分悬索桥

工程名称	主跨m	锚碇锚固系统类型	建成时间
润扬长江大桥(南汉桥)	1490	预应力锚固系统	2005年
南京长江四桥	1418	型钢锚固系统	2013年
江阴长江大桥	1385	预应力锚固系统	1999年
武汉阳逻长江大桥	1280	预应力锚固系统	2007年
湖南吉首矮寨大桥	1176	预应力锚固系统	2010年
广州珠江黄埔大桥	1108	预应力锚固系统	2008年
贵州坝陵河大桥	1088	预应力锚固系统	2009年
泰州长江大桥	2 × 1080	预应力锚固系统	2012年
宜昌长江大桥	960	预应力锚固系统	2001年
湖北西陵长江大桥	900	型钢锚固系统	1996年
湖北恩施四渡河大桥	900	预应力锚固系统	2009年
虎门大桥	888	型钢锚固系统	1997年
浙江舟山西侯门大桥	1650	预应力锚固系统	2009年
四川南溪长江大桥	820	预应力锚固系统	2012年
张家界澧水特大桥	856	预应力锚固系统	2013年

2.2 两种锚固系统详细比较

为更好地了解这两种锚固系统的优缺点, 本文对其进行了较为详细的分析比较:

2.2.1 型钢锚固系统的优点

使用应力较低, 对腐蚀不是很敏感, 一般在施工后的30~50年内不需要特别养护。

2.2.2 型钢锚固系统的缺点

(1) 用钢量大, 材料成本高。

(2) 安装精度要求高, 预埋施工难度大, 在和索股锚头连接时一般采用手拉葫芦与大量插片的方式来调整索股线型, 难度也很大, 承载后(如箱梁架设过程中)无法再调整线型。

(3) 主缆索股的线型在空载与承载时不同, 型钢锚固系统刚度大, 不能吸收索股的偏载, 索股锚头易产生较大的附加应力。

(4) 目前如锚碇这样的大体积混凝土出现裂缝难以避免, 所以实际上型钢锚固系统一直受到裂缝中腐蚀介质的侵蚀。为避免前锚面混凝土受拉开裂, 有的型钢拉杆在靠近前锚面部分设成无粘结, 此做法易导致该处积水。

(5) 不适于隧道锚。

空心板厚度为1200mm, 在原框架柱上设置700mm × 1200mm的暗梁, 暗梁中集中配置有粘结预应力筋, 暗梁之间为空心板区, 体积空心率为53.5%; 空心板填充材料之间设置预应力肋

梁, 短向配置有粘结预应力筋, 长向配置无粘结预应力筋。

2.2.3 预应力锚固系统的优点

(1) 系统用钢量少, 材料成本低。

(2) 用长拉杆调整主缆索股线型, 操作方便且可以随时再调整。

(3) 索股连接件系统设计有纠偏结构, 能吸收索股的偏载, 减少索股锚头的附加应力。

(4) 预应力筋防腐采用管道内注浆水泥浆或灌注油脂的形式, 有的采用无粘结筋+干风的形式, 防腐措施好于型钢锚固系统。

(5) 预应力束柔性好, 在锚碇砧体内排布灵活, 通过预应力束弯折设计, 可使锚碇砧体后锚面尺寸缩小, 减小砧体尺寸, 从而减少开挖量和混凝土用量, 较大程度上节约工程成本^[4], 所以预应力锚固系统最适合在隧道锚中应用。

2.2.4 预应力锚固系统的缺点

(1) 预应力筋的使用应力相对较高, 对预应力系统的防腐要求较高。

(2) 如采用灌浆粘结体系, 孔道压浆不易饱满。

(3) 如采用灌油无粘结体系, 对体系的密封要求、施工要求相对较高^[5]。

2.3 比较结果

通过这两种锚固系统优缺点的详细比较, 其结果也如文献[1]和[2]所示。总的来说是: 预应力锚固系统与型钢锚固系统相比, 除因应力较高对腐蚀较敏感外, 其它在成本、施工、受力方面有较明显的优势。但我们不能从这比较结果就得出型钢锚固系统优于预应力锚固系统的结论, 实际情况正好相反, 随着预应力锚固系统不断改进, 防腐措施不断完善, 其耐久性完全满足工程寿命要求, 得到了越来越多的应用。一些预应力锚固系统的“可换”功能成为额外的功能, 是“可换”而不是“必须换”, 是优点而不是缺点。

3 预应力锚固系统一些问题分析

目前, 我国还没有专门针对锚碇预应力锚固系统的标准或规范, 这是造成锚碇锚固系统设计多种多样并出现一些问题的根本原因。

3.1 预应力系统存在的问题

预应力筋的种类主要有钢绞线与钢拉杆两种类型,可分为有粘结和无粘结两种体系。预应力筋一般采用光面钢绞线、镀锌钢绞线、单丝环氧喷涂钢绞线或无粘结钢绞线。对于有粘结体系,预应力孔道内一般灌注水泥浆体;对于无粘结体系,预应力孔道内灌满防腐油脂或直接采用无粘结钢绞线,无粘结体系是一种可调、可监测、可更换的体系^[6]。

在预应力系统设计、施工中,常发现以下问题:

(1) 锚具安全度较小。因锚碇的混凝土多采用C30,而常用锚具一般适用于C40以上的混凝土构件,采用常规锚具应用于锚碇显然不合适,其安全度小,易出现锚固失效现象,如锚下锚垫板碎裂。所以用于锚碇的预应力锚具一般为特制锚具,其结构尺寸应大于常用锚具,要满足C30混凝土的承载要求,在施工图中一般都强调要采用特制锚具。

(2) 未设前、后锚面预应力束槽口或凸台。因预应力束的中心线要与主缆索股发散的中心线重合,预应力束中心线不垂直于前后锚面,所以一般通过设预应力束槽口或凸台来保证预应力束与主缆索股发散方向一致。有的施工图中没有设前、后锚面预应力束槽口或凸台,这使得预埋件(前锚垫板、后锚垫板、中间预埋钢管)的安装连接困难,前、后锚垫板的轴心线与索股发散方向不同轴。

(3) 用钢拉杆作为无粘结体系的预应力筋。为满足受力要求,钢拉杆直径一般较大、强度较高、需进行连接接长。这样的拉杆其生产工艺要求很高、制造成本远高于钢绞线,这种钢拉杆一般的生产厂家无法生产。拉杆一旦失效其应力将会部丢失,具有很大的安全隐患。

(4) 施工不规范。特别是对于灌油可换式无粘结体系,为保证体系密封可靠,需要较为专业的施工人员按照施工规程进行施工,否则易导致油脂渗漏。

3.2 索股连接件系统存在的问题

索股连接件系统由拉杆组件与连接器组成。拉杆组件一般由拉杆、螺母、锁紧螺母、球面垫圈、内球面垫圈组成;连接器主要由连接平板和支承筒组成或为一整体。在索股连接件系统设计、施工中,常发现以下问题:

(1) 设计的安全系数过小。一般地,索股连接件与主缆索股按等强度设计,其安全系数不小于2.5,而在一些施工图中常发现拉杆的安全系数不到2.0。

(2) 连接器结构形式多样。有的连接器为整体式(连接平板和支承筒合成一体),有的连接器为分体式(连接平板和支承筒分开)。整体式的连接器加工较为困难但安装定位较为方便;分式体的连接器加工较为容易,但如果连接平板与支承筒没有设计相互连接的构造,其安装定位较为困难。

(3) 采用的原材料不统一。如拉杆组件,有40Cr、35CrMo、35CrMnSiA、40CrNiMoA等多种不同材料。

(4) 有的检验要求不甚合理。如零件除磁探与超探外,还要求射线探伤,但射线探伤不适合于此类锻造件,实际操作也很困难。

3.3 施工装配问题

在当前市场上,由于经济利益等原因,常出现同一锚碇工程的预应力锚固系统由不同厂家供货的情况,最常见的是预应力系统和索股连接件系统分开由不同厂家供货,甚至预应力系统中的不同零部件都由不同厂家供货,这种把系统拆分供货的情况很容易导致装配时出现问题,各方责任难以分清,出现的问题也不好处理。

4 建议

4.1 统一设计标准、规范

目前没有相应的国家或行业标准,只有企业标准。只有制定统一的国家或行业标准,才能更好保证在设计、制造、安装、检验、试验等各环节更为合理,保证结构安全、经济合理。

(下转第30页)

大于30%，说明消除焊接残余应力的效果良好。

4 结束语

金属工件（铸件、锻件、焊接件）在冷热加工过程中都会产生残余应力，残余应力值高者（单位为Pa）在屈服极限附近构件中的残余应力大多数表现出很大的有害作用；如降低构件的实际强度、降低疲劳极限，造成应力腐蚀和脆性断裂，由于残余应力的松弛，使零件产生变形，大大的影响了构件的尺寸精度。因此降低和消除工件的残余应力就十分必要了，特别是在航空航天、船舶、铁路及工矿生产等应用的，由残余应力引起的疲劳失效更不容忽视。

目前的针对残余应力的不同处理方法有：自然时效方法和人工时效方法（包括热处理时效、敲击时效、振动时效、超声冲击时效）。相比，振动时效操作简单，成本低廉，且效果良好。通过本文实际测试，再次证明振动时效效果良好。

目前国际上关于残余应力的测量方法多种多样，就机械方法中有盲孔法、切割法、套环法，其次还有针对一定对象的环芯法。切割法和套环

法测量残余应力具有较大的破坏性，本文使用的盲孔法，试验破坏性小、适用性强，数据检测精度性较高，试验过程及操作较为简单。

参考文献

- [1] 陆向明. 金属结构残余内应力[J]. 航天工艺, 1998(01).
- [2] 蒋刚, 谭明华, 王伟明等. 残余应力测量方法的研究现状[J]. 机床与液压, 2007(06).
- [3] 陈会丽, 钟毅, 王华昆. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 云南冶金, 2005(03).
- [4] 王庆光. 残余应力检测技术及其应用[J]. 重型机械科技, 2002(04).
- [5] 蒋刚, 何闻, 郑建毅. 高频振动时效的机理与实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009(07).
- [6] 王超. 振动时效机理、多点振动时效方法的研究及实现[D]. 兰州交通大学, 2013(06).
- [7] 饶德林, 朱政强, 葛景国. 振动时效消除拼焊不锈钢板的残余应力[J]. 振动与冲击, 2005(02).
- [8] 王娜. 中厚板焊接残余应力测试的盲孔法研究[D]. 大连理工大学, 2007(05).
- [9] 周勇, 王洪铎, 石凯. 浅谈盲孔法测焊接残余应力电阻应变片粘贴技术[J]. 高校实验室工作研究, 2008(04).
- [10] JB/T5926-2005. 振动时效效果评定方法[S].
- [11] JB/T10375-2002. 焊接构件振动时效工艺参数选择及技术要求[S].

（上接第21页）

4.2 当前注意事项

在标准未出来之前，目前在预应力锚固系统设计与施工中建议注意以下事项：

（1）建议由经验较丰富的专业人员进行设计，安全系数不应小于2.5。

（2）根据工程情况，选用最合适的预应力锚固系统。

（3）当防腐要求较高时，建议钢绞线优先采用环氧喷涂钢绞线或无粘结钢绞线。

（4）锚固系统不应拆分采购，最大程度避免出现配套问题。

（5）施工时采用专业施工人员，按有关施工细则执行，保证施工质量。

5 展望锚碇预应力锚固系统的发展

（1）预应力锚固系统将得到进一步应用；

（2）预应力锚固系统将有统一的设计标准

或规范，确保系统更安全可靠；

（3）预应力锚固系统的防腐性能更可靠，将沿着可监测、可更换的方向发展；

（4）施工方法趋于规范、简单、方便；

（5）新型锚固系统的出现，将具有更优的性价比。

参考文献

- [1] 陈晓军. 大跨径悬索桥锚碇锚固系统的比较[J]. 交通世界, 2012年第15期
- [2] 李海, 鲜亮, 姚志安. 国内大跨径悬索桥锚碇锚固系统比较研究[J]. 公路工程, 2011.2
- [3] 中国公路学会桥梁和结构工程分会. 面向创新的中国现代桥梁[M]. 人民交通出版社, 2009. 4
- [4] 朱玉, 廖朝华等. 大跨径悬索桥隧道锚设计及结构性性能评价[J]. 桥梁建设, 2005(2)
- [5] 赵干明, 张东福等. 弯束可换式锚碇锚固系统在湖南矮寨桥的应用[J]. 预应力技术, 2010(5)
- [6] 徐国平, 刘明虎等. 悬索桥锚碇可更换无粘结预应力锚固系统试验研究[J]. 桥梁建设, 2006(06)