

基于全寿命设计理论的斜拉桥拉索体系选择研究

陈 伟¹, 胡大新²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院 河北 石家庄 050043; 2. 中国铁道科学研究院 北京 100081)

摘要: 全寿命设计理论是基于生命周期造价最低的理念,综合考虑规划、设计、施工以及耐久性设计、管养设计、拆除、回收再利用设计、风险评估及保险策略和全寿命周期成本分析等方面,使桥梁设计达到安全、经济、耐久及环保等。在分析斜拉桥拉索体系特点的基础上,重点比较了平行钢丝拉索和钢绞线拉索的各项技术指标以及两者在施工过程中的特点,结合全寿命设计理论,从全寿命造价最低及可持续发展的角度,得出钢绞线拉索体系较平行钢丝拉索体系优越的结论。建议在斜拉桥的施工中,多应用钢绞线拉索体系。

关键词: 全寿命设计理论; 平行钢丝斜拉索; 钢绞线斜拉索; 生命周期造价; 防腐材料

中图分类号: U448.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2012)02-0011-05

0 引言

斜拉桥作为一种重要的桥型,在 200 ~ 800 m 的跨度范围内具有很强的竞争能力。1956 年,瑞典建成第一座现代化斜拉桥,至今已有 50 多年的历史。到目前为止,世界各国修建了 400 座左右的斜拉桥,我国占 100 座以上,斜拉桥已成为大江大河首选的比较方案桥型。而这种桥型的主要组成部分中,斜拉索的作用相当重要。

在全世界修建的 400 座左右的斜拉桥中,由于斜拉索病害的影响,使得部分早期修建的斜拉桥结构损坏非常严重。早期修建的斜拉桥普遍存在拉索防护层过早失效、使用寿命缩短的问题。据不完全统计,20 世纪 70 至 90 年代初,我国修建的 30 余座斜拉桥中,有 35% 的斜拉桥因斜拉索锈蚀原因已全部或部分更换了斜拉索,在 2005 年附近的几年内进行了 10 余座 20 世纪 90 年代后修建的斜拉桥的换索。这充分表明传统斜拉桥中拉索的选型和设计理念导致现有斜拉桥使用性能差、使用寿命短,全寿命经济指标差等问题,给后期的运营维护带来巨大的经济负担,也增加了社会的负担。因此如何从全寿命设计理念角度出发开展斜拉桥拉索的选型和设计成为一个比较重要的研究课题^[1]。

斜拉索作为一种承受拉力的构件,其体系随材料(包括钢材及防护材料)和锚固技术的发展也经历了几个阶段。斜拉索的主要形式包括:由多根钢丝绞成的缆索或钢丝互扣绞成的缆绳、平行高强钢筋、直径为 7 mm 平行预应力钢丝,或是由 7 根钢丝绞成直径为 15 mm 的预应力钢绞线。目前在斜拉索选择时主要采用平行预应力钢丝拉索和钢绞线拉索两种主要的体系。

桥梁全寿命设计理论是指在桥梁设计中,针对规划、设计、施工、运营、管养、拆除或回收再利用的全过程,实现桥梁全寿命周期内总体性能(功能、成本、人文、环境等)最优的设计。与传统桥梁设计相比,桥梁全寿命设计在开展传统设计中的设计工作的同时,将桥梁设计范围从建设期拓展到整个寿命周期,增加了传统桥梁设计中未考虑的设计内容,具体包括:耐久性设计、管养设计、拆除、回收再利用设计、风险评估及保险策略和全寿命周期成本分析等。

本文在全寿命设计理论的框架下,分析拉索体系特点的基础上,根据全寿命设计的方法,对拉索体系的选择进行研究分析,为斜拉桥中拉索的选择提供依据。

收稿日期: 2012-05-21

作者简介: 陈伟 男 1972 年出生 副教授

基金项目: 河北省科技厅课题(09202152D)

1 拉索体系特点

如前所述,在斜拉桥的发展过程中,出现过不同的拉索形式,但随着技术的发展,目前常用的体系一般为两种:平行预应力钢丝拉索和钢绞线拉索。斜拉索构件的主要组成部分包括:锚固体系、索体、防腐系统。下面结合拉索的组成,分别介绍两类拉索体系的特点。

1.1 平行预应力钢丝拉索体系

1.1.1 平行预应力钢丝拉索组成

平行预应力钢丝拉索体系的索体材料是高强度钢丝成束,其直径一般为 7 mm,钢丝数量可根据索力的大小选择;锚固体系在两端用冷铸锚结构组件锚固(或用热铸锚组件锚固);防护采用钢丝表层镀锌,钢丝束外面绕包带,然后是 HDPE 护套。具体结构见图 1。

1.1.2 平行钢丝拉索制作和施工流程

钢丝定长下料→编索→扭角绕包($2^{\circ} \sim 4^{\circ}$)→热挤 HDPE→定长截断→装锚头及锚头→灌注环氧铁砂→固化→超张拉→上盘运输至工地→吊装桥面放索→软、硬牵引入塔口→张拉及调整索力。

平行钢丝拉索中,钢丝与 HDPE 热熔粘结,钢丝受力时可传递给 HDPE,HDPE 在受力状态下易开裂;镀锌层易在运输及制索时损坏,镀锌层和基体金属中的晶格渗氢,造成晶格扭曲,内应力增大,产生氢脆;镀锌层受损时,极易发生电极反应,镀锌层的腐蚀加速。镀锌后钢丝强度降低约 5%,疲劳性能降低约 18%。由于钢丝成品索钢丝相互扭角挤压,钢丝间易产生微动摩擦,会降低疲劳性能;疲劳应力上限荷载 $0.4f_b$,应力幅 200 MPa。这种拉索在实际应用中,出现了不少病害,导致许多斜拉桥在建成 10 a 左右就进行了换索,付出了高昂的代价。

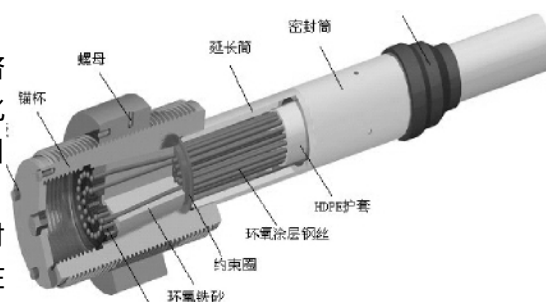
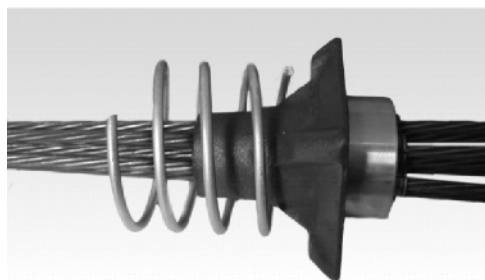


图 1 平行钢丝拉索体系构造

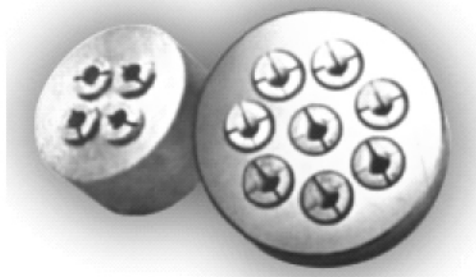
1.2 钢绞线拉索体系

1.2.1 钢绞线拉索组成

钢绞线拉索的索体材料是高强度钢绞线,一般由 7 根直径为 5 mm 的高强钢丝绞成一束,然后再由多束组成一根拉索。锚固系统采用专用夹片群锚组件锚固;防护系统采用三重防护:单根环氧涂层、单根涂油脂及热挤 HDPE,灌注防护油脂或环氧砂浆,安装 HDPE 护管。具体结构见图 2(图中未示防护系统)。



(a) 锚固体系组成



(b) 锚头及夹片

图 2 钢绞线斜拉索体系构造

1.2.2 钢绞线斜拉索制作及安装流程

光面钢绞线→单根环氧涂层→单根涂油脂及热挤 HDPE→上盘运输至工地→连续单根放索后穿索同时安装 HDPE 护管→单根钢绞线张拉→钢绞线拉索整体张拉及调索→灌注防护油脂或环氧砂浆。

钢绞线拉索中钢绞线之间互相不接触,有很高的抗疲劳性,疲劳应力上限荷载 $0.45f_b$,应力幅 250 MPa;安装简单,容易更换;从加工厂到工地施工全过程能得到很好地保护;任何时候可以逐束检查、调整索力;这些特点符合桥梁全寿命设计理论的要求,决定了其具有广泛的应用前景。

2 基于全寿命设计理论的拉索体系选择

目前桥梁设计方法中,全寿命设计理论受到越来越多的重视。桥梁全寿命设计是针对桥梁整个生命周期而言的,也称为“桥梁生命周期设计”,不同于传统的仅考虑桥梁成桥状态的桥梁设计方法,它考虑桥梁的所有方面,从设计、施工和使用期管理,一直到拆除和材料的回收。因此,桥梁全寿命设计可简单定义为:从桥梁结构设计、管理、建设和运营的各个环节来寻求恰当方法和措施来满足桥梁结构全寿命周期的总体性能最优(经济性、人文、生态等)的设计理念和方法^[2]。

全寿命成本是确定桥梁从建成到其寿命期结束的总费用(即 Life Cycle Cost,简写成 LCC),进行全寿命成本分析的方法就是全寿命经济性分析(LCCA)法,在假定不同桥梁设计方案得到相同利润的情况下,可以用来选择成本最优的方案,是进行桥梁不同设计方案比较和选择的有效工具。执行 LCCA 法,要求一个工程立项时必须对其投入资金及其合理性进行评估。全部投资资金应包括初始投资和进一步投资两部分组成:第一部分是指建设时的设计、施工相关费用;第二部分包括保证达到寿命期所必须的进一步费用(如修复费等)。下面基于全寿命设计理论,从两类拉索的强度、疲劳性能、抗震性能、锚固构造、挂索施工、换索工艺、防护材料、使用寿命和后期维护更换费用等角度探讨斜拉桥主要受力构件拉索体系的选择。

2.1 平行钢丝拉索和钢绞线两类拉索相关性能比较

为了合理的做出拉索的选择,首先从平行钢丝拉索和钢绞线拉索的构造特点,包括钢材强度、拉索用量、疲劳性能、抗震特性、锚固体系和使用寿命等方面进行比较。从材料强度来看,平行钢丝斜拉索钢丝的强度达到 1 670 MPa,而钢绞线斜拉索钢丝的强度为 1 860 MPa,这导致在拉索重量上,钢绞线斜拉索节约约 8%,直接导致造价的降低。在疲劳性能方面,平行钢丝斜拉索的钢丝镀锌后强度降低约 5%,疲劳性能降低约 18%,且由于钢丝成品索钢丝相互扭角挤压,钢丝间易产生微动摩擦,会降低疲劳性能。疲劳应力上限荷载 $0.4f_b$,应力幅 200 MPa;钢绞线斜拉索疲劳性能与钢绞线相同疲劳应力上限荷载 $0.45f_b$,应力幅 250 MPa。在抗震性能上,平行钢丝拉索钢丝拉索结构为整体粘结,抗震性能较差,但钢丝拉索直径小,抗震性能较好;钢绞线拉索单根隔离,提高震动时内部阻尼系数,但钢绞线拉索直径较大,抗震性能较差,比较看来两者各有优缺点。在锚固体系上,平行钢丝拉索采用冷铸锚结构组件锚固或热铸锚组件锚固;钢绞线拉索则采用专用夹片群锚组件锚固。在使用寿命上,平行钢丝拉索预计为 30 a,但不少斜拉桥 10 a 不到已换索,病害多;钢绞线斜拉索预计寿命为 50 a,到目前为止,还无换索先例。从以上对比可以看出,钢绞线拉索具有较大的优势。

全寿命设计方法特别强调构件的耐久性设计,对斜拉索来说,其耐久性与防护体系密切相关。下面从平行钢丝拉索和钢绞线拉索防护体系采用的材料、结构及防护体系的特点进行了对比,看看两者的区别。在防护材料上,平行钢丝斜拉索采用镀锌、绕包带、HDPE 层套管,钢丝与 HDPE 套管热熔粘结,钢丝受力时可传递给 HDPE 套管,HDPE 套管在受力状态下易开裂;镀锌层易在运输及制索时损坏,镀锌层和基体金属中的晶格渗氢,造成晶格扭曲,内应力增大,产生氢脆;镀锌层受损时,极易发生电极反应,镀锌层的腐蚀加速;钢绞线拉索防护体系防护材料采用环氧涂层、油脂、单根 HDPE 套管,HDPE 总护套。HDPE 护套不受钢绞线传递力的影响,不易开裂;环氧涂层在运输及制索过程不易损坏,且有机环氧涂层耐蚀能力极强。可以看出,钢绞线拉索防护体系的耐久性优于平行钢丝拉索,从而保证了钢绞线拉索具有较长的使用年限。

全寿命设计方法与传统设计方法的不同之一在于对运营期更换施工过程的关注,它把施工过程、运营维修、养护和设计看得同等重要。下面对两种拉索体系在施工过程中的相关指标进行了对比。从施工时挂索周期上比较,平行钢丝斜拉索整体一次挂索,周期短,但需大型起重设备,在挂索时为保护护套,需采用较大的软牵引力和拉杆牵引力工艺;钢绞线斜拉索则单根钢绞线挂索,不需大型起重及牵引设备。从张拉力控制上,平行钢丝斜拉索整个索体一起张拉,各丝受力均匀;钢绞线斜拉索则以钢绞线为单位进行张拉,受力易不均。从拉索长度控制上,平行钢丝斜拉索定长制索,长度误差必须控制在 2‰以内,由于

螺纹调节长度较短,不利于调节制索长度误差和施工定位误差,不利于调节数年后产生的索的挠度调整;钢绞线拉索对下料长度要求不高,易于后期的索的挠度调整。在运输储存上,平行钢丝斜拉索需大型运输工具,储存占地面积大;钢绞线拉索则不存在这些问题。在施工过程的防护问题上,平行钢丝斜拉索要求较高,HDPE 套管易受损;钢绞线斜拉索则在施工过程中对防护要求不高。在换索时,平行钢丝斜拉索必须整个索体更换,费用高,为保证安全,一般要封闭交通;而钢绞线斜拉索可单根钢绞线更换,费用相对低,可不封闭交通。可以看出,钢绞线拉索比钢丝拉索具有施工方便、不需大型起重设备、长度控制容易、换索简单方便、运输储存要求低、施工防护要求少等优点,其唯一不足是在保证每束钢绞线受力均匀上有一定难度,受力易不均。

2.2 拉索后期维护及更换费用分析

在传统的斜拉桥设计、施工、使用过程中,尽管设计、施工、使用者对斜拉桥的关键部位如斜拉索采取了各种防腐、减隔振措施,但由于方法、工艺、材料、构造细节等不合理,使得斜拉索腐蚀退化和振动疲劳衰减已经成为制约斜拉桥使用寿命的关键因素。如著名的 MaraCaibo 桥及 Kohlbrand Estuary 桥,前者在使用 16 a 时换索,耗资 5 000 万美元,换索工期达 2 a,后者在运营 3 a 就更换全部拉索,耗资 600 万美元,为原造价的 4 倍。国内的广州海印大桥为中孔 175 m 的 3 跨双塔单索面预应力砼斜拉桥,1988 年 12 月建成通车,拉索由 258 根 $\Phi 5$ mm 镀锌钢丝组成,PE 套管防护,其间压注了水泥浆,套管外再缠包环氧树脂采用玻璃钢外壳层,由于防护出现问题,1995 年 5 月出现拉索断落和松弛,之后,对 186 根拉索全部更换,换索耗资 2 000 万元,工期半年^[3]。

从这些数据可以看出,采用不同的拉索体系,必然带来不同的养护维修费用,从而使生命周期造价有较大的不同。根据平行钢丝拉索及钢绞线拉索的预计设计生命周期,以全桥 100 a 的设计周期,平行钢丝拉索体系需换索 2~3 次,而钢绞线拉索仅需一次,采用钢绞线拉索可大大降低斜拉桥的生命周期造价。故在斜拉桥的设计中应根据实际情况,尽量选择钢绞线拉索体系。

钢绞线拉索体系在美国已得到较普遍地使用,在欧洲、亚洲、澳大利亚的相关国家两种拉索体系均在应用。美国已不推荐使用镀锌钢丝作斜拉索体系。我国 20 世纪八九十年代以平行钢丝拉索为主,90 年代末及 2000 年后钢绞线拉索已得到推广应用。但不少采用钢丝拉索体系的斜拉桥和拱桥(吊杆采用与斜拉索类似的结构)近年来因拉索防护体系的损坏而不得不进行换索或换吊杆。如广州海印大桥、四川犍为岷江公路桥、济南黄河公路桥、上海恒丰路立交桥、重庆石门桥、上虞斜拉桥、宜宾小南门拱桥等。还有部分斜拉桥、拱桥都还处于带病工作状态(如珠海淇澳大桥、南宁三桥等)。换索直接费用均在 1 000 万元以上,因封闭交通引起的间接损失还不在于其内。因此选择性能优越的拉索和建立有效的施工控制和维护是斜拉桥生命的有效保证^[4]。

3 结语

基于桥梁全寿命设计理论,对斜拉桥主要受力构件之一的斜拉索选择进行了探讨,从拉索的力学特点、防护构造、更换工艺以及后期维护费用等角度比较了两类典型斜拉索的特点,分析表明,从全寿命周期成本看,在综合考虑拉索强度、疲劳、腐蚀、施工及后期维护等方面的要求,钢绞线拉索体系具有明显的优点。建议在我国斜拉桥的设计中采用。从而达到桥梁的生命周期造价最低,这既是保证桥梁安全的需要,也是人类社会可持续发展的需要。

参 考 文 献

- [1] 吴海军,陈艾荣. 桥梁耐久性设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 57-67.
- [2] Sarja A. Integrated life cycle design of structures[M]. Spon: London and New York, 2002: 1-137.
- [3] 朱战良. 广东九江大桥换索技术[J]. 中外公路, 2003, 5: 20-24.
- [4] 代璞,唐继舜,谢海清. 犍为岷江大桥换索工程[J]. 四川建筑, 2005, 2: 120-122.

(下转第 24 页)

tion safety and construction period and construction cost. A case study was done for super-long steel sheet pile cofferdam construction of deepwater foundation at Ying River Bridge of railway line from Fuyang to Lu'an. Three-dimensional finite element model considering steel sheet pile and internal bracing and soil layer is established. Four construction schemes are selected according to different construction opportunity of bottoming concrete. Construction scheme of internal bracing is discussed for steel sheet pile cofferdam. Results show that earlier construction time of bottoming concrete may provide safer cofferdam structure, and the actual construction scheme should be determined by scheme comparison and analysis according to engineering geological conditions of bridge site and actual engineering situations.

Key words: deepwater foundation; steel sheet pile cofferdam; internal bracing construction; construction scheme; numerical simulation

(责任编辑 车轩玉)

~~~~~  
(上接第 14 页)

## Selection of Cable-stay System for Cable-stayed Bridge Based on Full Life Design Theory

Chen Wei<sup>1</sup>, Hu Daxin<sup>2</sup>

(1. Civil Engineering School of Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Full life design theory is based on the minimum full life cost, which takes into consideration the durability design, management and maintenance design, remove and reuse of structure, risk assessment and insurance strategy, and is aimed to make the bridge design safe, economic, durable and protective to environment. After analyzing the characteristics of cable stay systems, comparing the specification characteristics and the fabrication and erection methods between parallel steel wires cable system and strand cable stay system, based on the minimum full life cost of full life design theory, it is concluded that strand cable system is better than the parallel steel wire cable system. Strand cable system shall be used firstly in cable-stayed bridges.

**Key words:** full life design theory; parallel wire stay cable; strand stay cable; full life cost; preservation material

(责任编辑 刘宪福)