

大跨度公铁两用斜拉桥研究进展

雷俊卿, 黄祖慰, 曹珊珊, 刘昊苏, 桂成中

北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044

摘要 跨海大桥是最需要考虑节约资源和进行环境保护的桥梁, 而大跨度公铁两用斜拉桥是世界上设计的桥梁中占用跨海通道资源最节约型的大桥, 是跨海大桥设计的首选桥型。通过对国内外已建或在建的跨海通道大跨度公铁两用斜拉桥的调研, 论述了部分大跨度公铁两用斜拉桥的结构设计关键技术, 分析了大跨度公铁两用斜拉桥的钢梁和斜拉索的耐久性, 并结合大跨度公铁两用斜拉桥的结构特点, 对比了适用于大跨度公铁两用大桥斜拉桥的结构体系和桥面布置, 指出了影响公铁两用斜拉桥跨度增大的问题与对策。

关键词 跨海通道; 公铁两用大桥; 大跨度斜拉桥; 结构体系; 桥梁耐久性

由于地球上土地、山川、河流、海洋资源的宝贵与匮乏, 在进行土木工程建设时, 不得不考虑节约资源和环境友好相处, 就是中国的东方哲学天人合一, 与大自然和谐相处共生。因此, 大跨度公铁两用大桥由于能使公路和铁路共用桥位, 与分别建公路桥和铁路桥相比, 不仅能充分合理地利用土地和山川河流以及海洋的自然空间, 而且在基础建设的材料和施工费用方面可以大大节省, 具有良好的环保性、经济性、安全性和可持续发展性。

随着基础建设投入和桥梁跨度的继续增大, 由于大跨度公铁两用桥梁节约桥位通道资源, 有利于环境保护及可持续发展的重要要素而备受青睐。大跨度公铁两用斜拉桥, 由于斜拉索直接锚固在梁和塔上的结构优越性, 使其成为跨海大桥设计时的首选桥型^[1-23]。本文论述跨海通道的大跨度公铁两用斜拉桥的发展与特点。

1 大跨度公铁两用斜拉桥的发展现状

中国以前修建的跨海公路大桥, 最多用的就是斜拉桥桥型。如2002年6月26日正式开工建设, 2005年5月竣工建成的长32.5 km的跨海东海大桥是公路大桥, 主桥是斜拉桥; 2003年11月14日开工建设, 2008年5月1日建成通车的长36 km的跨海大桥——杭州湾大桥, 也是公路大桥, 主航道桥是斜拉桥; 2009年建成通车的舟山跨海大桥的金塘大桥主航道桥是斜拉桥。2009年12月15日开工建设, 一期工程计划于2017年年底建成的港珠澳跨海大桥, 主航道桥是斜拉桥。以前中国对公铁两用跨海大桥的合建重视不够, 现在正在转变观念, 进行公铁两用跨海大桥合建的前期研究与建设工

作。将要建设的杭州湾第二通道跨海大桥, 正在做公铁合建跨海大桥的前期论证工作; 海南省的琼州海峡跨海大桥也在论证公铁合建大桥的方案。目前正在建设的福建的平潭海峡大桥即为公铁两用斜拉桥。

正在建设的平潭海峡公铁两用大桥是福州至平潭铁路客运专线跨海段桥梁工程的主体部分, 大桥工程包括跨越元洪航道、鼓屿门水道和大小练岛水道的3座航道桥, 以及引桥、铁路路基三大部分, 为钢桁结合梁斜拉桥; 采用双层桥面, 下层为双线铁路, 设计时速为200 km/h, 能跑动车组; 上层为时速100 km/h的6车道高速公路, 建成后将成为中国第一座公铁两用跨海大桥。平潭群岛是中国大陆离台湾地区最近的岛屿, 距台湾新竹港仅125 km。跨海大桥远期规划可延长至台湾, 对促进两岸经贸合作和文化交流等具有重要意义。国内外已建成的跨度大于400 m的公铁两用大桥已经有10余座, 其中设计跨度最大的为正在建设的主跨为1092 m公铁两用的沪通长江大桥斜拉桥。

日本的本州至四国的跨海联络大桥, 就有公铁两用大桥合建的桥例, 如柜石岛·岩黑岛大跨度公铁两用斜拉桥, 是4线铁路4车道公路的桥梁。德国至丹麦的费马恩海峡大桥也是公铁两用斜拉桥。世界上的大桥已达300余座, 但绝大多数为公路大桥, 铁路大桥的发展相对缓慢, 而公铁两用大桥也只在最近几十年的时间里得到了较快的发展。典型的公铁两用斜拉桥如图1和图2所示。

目前世界上已经建成或在建的大跨度公铁两用大桥的结构特点的主要内容如表1所示^[1-14]。

收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578047, 51178042); 中国铁路总公司科技研究开发项目(2014G004-B); 交通运输部创新科技项目(2013315494011); 中国交通建设股份有限公司科技特大研发项目(2014-ZJKJ-03)

作者简介: 雷俊卿, 教授, 研究方向为大跨度桥梁结构, 电子邮箱: lei_jq@126.com

引用格式: 雷俊卿, 黄祖慰, 曹珊珊, 等. 大跨度公铁两用斜拉桥研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(21): 27-33; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.21.003



(a) 东海大桥



(b) 杭州湾跨海大桥



(c) 港珠澳大桥



(d) 浙江舟山金塘大桥

图 1 中国的跨海大桥斜拉桥

Fig. 1 China's cross sea bridge cable-stay bridge



(a) 德国至丹麦的费马恩海峡大桥



(b) 日本的柜石岛跨海大桥



(c) 中国的平潭海峡大桥



(d) 中国的沪通长江大桥

图 2 公铁两用斜拉桥

Fig. 2 Rail-road cable-stay bridge

表 1 国内外部分公铁两用大桥斜拉桥

Tab. 1 Summary of cable-stayed rail-road bridge around the world

序号	桥名	主跨/m	桥塔类型及塔高	拉索布置	主梁形式及梁高	竣工时间/年	国家
1	柜石岛·岩黑岛桥	420	H型, 161 m	平行双索面	钢桁梁, 13.9 m	1988	日本
2	香港汲水门大桥	430	H型, 150 m	平行双索面	钢桁梁, 8 m	1997	中国
3	厄勒桑特大桥	490	H型, 150 m	平行双索面	钢桁梁, 9.4 m	2000	丹麦
4	芜湖公铁两用长江大桥	312	H型, 84.2 m	平行双索面	钢桁梁, 14 m	2000	中国
5	武汉天兴洲公铁两用长江大桥	504	钻石型, 188.5 m	平行双索面	钢桁梁, 15.2 m	2009	中国
6	郑州黄河公铁两用大桥	168	独塔, 37 m	单索面	钢桁梁, 14 m	2010	中国
7	上海闵浦二桥公铁两用大桥	251.4	独塔 H型, 148 m	平行双索面	钢桁梁, 9.6 m	2010	中国
8	黄冈公铁两用长江大桥	567	H型, 193.5 m	平行双索面	钢桁梁, 15.5 m	2014	中国
9	铜陵公铁两用长江大桥	630	钻石型, 225 m	倾斜三索面	钢桁梁, 15.5 m	2015	中国
10	费马恩大桥公铁两用跨海大桥	724	H型, 272 m	倾斜双索面	钢桁梁, 12.9 m	1963	丹麦
11	江津鼎山公铁两用长江大桥	464	宝塔型钢筋混凝土结构索塔/188.3 m	双塔斜拉桥	钢桁梁, 12.9 m	2013	中国
12	重庆东水门公铁两用长江大桥	445	南塔 172.61 m, 北塔 162.49 m	单索面	钢桁架双层	2014	中国
13	重庆千厮门公轨两用大桥	312	圆润的天梭造型/塔高 182 m	单索面	钢桁架双层	2014	中国
14	沪通公铁两用长江大桥	1092	钻石型, 345 m	倾斜三索面	钢桁梁, 16 m	在建	中国
15	平潭海峡公铁两用大桥	532	H型, 200 m	平行双索面	钢桁梁, 桁高 13.5 m	在建 2019	中国
16	湖北公安公铁两用长江大桥	518	H型, 182.5 m	双塔双索面	钢桁梁斜拉桥, 13 m	2016	中国
17	商合杭高铁及芜湖公铁两用长江大桥	588	高低塔钢桁梁斜拉桥, 高塔 150 m, 低塔 130.5 m	倾斜双索面	钢桁梁, 15 m	在建	中国
18	郭家沱公铁两用长江大桥	720	钻石型, 345 m	倾斜三索面	钢桁梁	在建	中国

2 大跨度公铁两用斜拉桥的结构体系

大跨度公铁两用斜拉桥是由梁、斜拉索、塔柱、墩台和基础五大部分组成。其结构体系布置及斜拉索、主梁、桥塔都会对结构的整体刚度产生影响。大桥本身属于柔性结构,当其用于铁路时,由于列车荷载大、运行安全性及平稳性要求高、竖向刚度及梁端转角控制严格,这对结构设计提出了更高的要求。

2.1 梁-塔体系

大跨度公铁两用斜拉桥的梁塔体系形式主要有漂浮体系、支承体系、固结体系和刚构体系等。漂浮体系具有主梁内力较均匀、梁塔交接处无负弯矩峰值等特点。支承体系在设竖向支座的主梁内力在梁塔交界处有一定的负弯矩峰值。固结体系塔柱内力较小,但在梁塔交接处会出现较大的负弯矩峰值。刚构体系因其按梁、塔墩刚度比分配内力,主梁在固结点附近内力相当大。由以上4种体系的受力性能可以判断,漂浮体系和支承体系更加适用于大跨度大桥。

2.2 主梁

大跨度公铁两用斜拉桥的主梁需要较大的截面积来承

受轴压力,常规的桁架杆件设计困难;同时主梁又要满足行车所需要的横向、竖向刚度,兼顾行车桥面的整体性。因此,设计可采用新型箱桁组合桁架结构,桁架下弦是由与主梁断面同宽的钢箱组成,钢箱同时兼作整体桥面;上弦公路桥面采用正交异性钢桥面板,并与主桁结合。新型箱桁组合截面主梁结构中的公路、铁路桥面均为整体钢桥面,参与了总体受力,有效地增加了加劲梁横断面的受力面积,突破了桥梁跨度受制于钢梁杆件因受力大而难于设计、制造的瓶颈。

2.3 桥塔

大跨度公铁两用斜拉桥的桥塔形式有独塔、双塔、3塔和多塔等。材料以钢和混凝土塔为主。塔型有H型、倒Y型、A型、钻石型等。大桥主塔要承受上部结构自重产生的轴力、温度作用,施工过程中的体系转换作用,张拉索力及调索时产生的内力,还要承受活载、风作用、地震作用等。

2.4 斜拉索

在斜拉索的空间布置上,使用A型索塔或钻石型桥塔配合倾斜双索面,可以避免双索面相互平行导致的主梁与塔的扭转耦合现象,将会提高抗风稳定性,在大跨径大桥中更具

竞争力。在超大跨度的公铁两用桥梁中,主梁设计时需要满足宽跨比的要求,横向宽度往往会较大。采用三索面的布置形式能够有效地优化主梁的横向受力,减少主梁横向构造钢材用量。在斜拉索的立面布置上,修正扇型体系是综合纯扇型体系和竖琴型体系两者的优势而形成的,既能使拉索锚头较为均匀地分布,又能够有效减小桥塔弯矩,因此特别是在大跨径大桥中多采用这一中拉索形式。

3 大跨度公铁两用斜拉桥的桥面布置

大跨度公铁两用斜拉桥结构体系布置和桥梁类型都会对桥梁结构的整体刚度产生影响。特别对于高速铁路和高速公路两用大桥,由于列车荷载大、运行安全性及平稳性要求高、竖向刚度及梁端转角控制严格,这对结构设计提出了更高要求。而公铁两用斜拉桥则可以满足高速铁路和高速公路桥梁对结构刚度的要求。公铁两用大桥有上下两层桥面和平层的布置形式。

3.1 主梁的上下双层结构布置

双层式公铁两用桥(图3)布置中,主桁架的中距可由铁路净空的需要以及横向刚度的条件决定。这样布置使公路桥面视野开阔,但为使桥头公路能够与公路桥面接通,则必须为桥头公路修建引桥。

公铁两用桥规划时,公路桥面的设计宽度,与公路运输

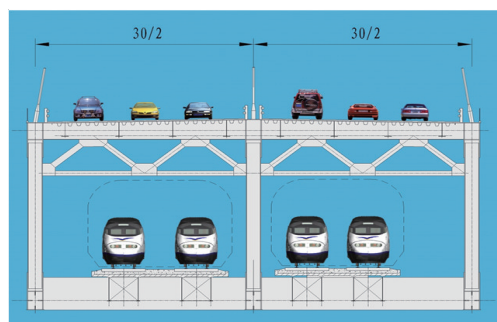


图3 双层桥面主梁断面示意

Fig. 3 Main girder section of double deck bridge diagram

4 大跨度公铁两用斜拉桥发展的机遇与挑战

当考虑设计建造更大跨度的公铁两用斜拉桥时,在计算理论及规范参照方面的刚度取值问题,主梁承受的轴向力问题,以及斜拉索的强度、垂度效应、弹性模量降低、风动稳定性问题等,这些问题正在制约着大桥跨度的更大发展。

4.1 铁路列车荷载的变化

曾经在铁路发展中发挥积极作用的中-活载图式目前不论从等级上还是图式上都不再适应中国铁路发展的要求,主要原因是牵引重量增加、运营速度提高、编组特征多元化、运输设备复杂化以及铁路发展与国际接轨等。由此铁路列车的计算荷载从单一的中-活载(中-Z)图式修订为包括城际轨

量有关。在一般情况下,若铁路为双线则公路设计应以不少于4车道为宜。武汉天兴洲长江大桥正桥桥面布置是按铁路4线、公路为6车道设计的公铁两用桥,其桥面宽度为30 m。靠近大城市的公铁两用桥,人流、车流密度均较大,为此当公路为6车道时,人行道宽度为2.25 m。

根据桥头铁路和公路的实际情况,有时也可以将公铁两用桥布置成公路在下面、铁路在上面的双层式结构。

3.2 主梁的平层结构布置

平层桥面布置中,铁路布置在两片钢桁架或箱梁的中间,公路分别置于两桁架或箱梁之外左右对称。如意大利墨西哥海峡公铁两用大桥的主跨达到3300 m,桥面宽约60 m,桥面为平层布置,如图4所示。平层布置具有公路路面标高较低的优点,但不可避免的是桥头公路的接线必须与铁路相交叉。有关铁路与公路交叉之布置,应以立交为最好。

3.3 公铁两用斜拉桥的桥面结构选择

公铁两用斜拉桥的桥面结构可以是钢筋混凝土结构,或钢结构加水泥混凝土铺装面层,或沥青混凝土铺装面层。用正交异性钢桥面板代替钢筋混凝土桥面板,可显著减轻桥梁的自重,并具有其他一些优点。长大跨度的公铁两用斜拉钢桥采用这种新型桥面,已成为发展的趋势。在设计公铁两用斜拉桥时,也大多采用正交异性钢桥面板加沥青混凝土铺装面层。

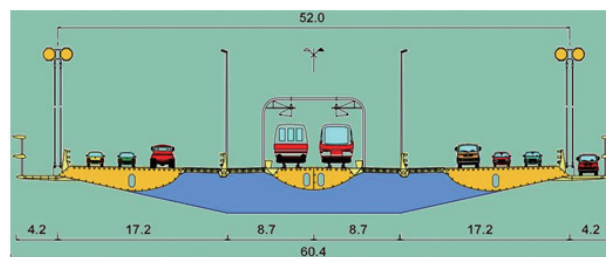


图4 平层桥面主梁断面示意(墨西哥海峡大桥)

Fig. 4 Leveling the deck cross-section diagram (Strait of Messina Bridge)

道(ZC、ZK)、客运专线(ZK)、客货共线(ZKH)、货运专线(ZH)的一系列铁路荷载图式^[15]。

4.2 刚度指标的变化

随着大桥跨度的增加,结构的整体刚度不断减小,斜拉索的垂度效应、弹性模量非线性等问题越发显著,非线性与线性的计算结果的差距越来越大。大跨度公铁两用大桥本身属于柔性结构,列车在荷载作用下的挠度与跨度的比值一般满足不了现行桥梁规范中基于中小跨度桥梁竖向、横向刚度的要求,应对大跨度大桥这一柔性体系的刚度指标进行放宽。从已建成的桥梁调查得出,大跨度公铁两用桥梁的刚度指标已经超过了现阶段的相关限值,但是并未发生因桥梁刚

度不足而影响行车的问题。

4.3 主梁轴力的增大

随着跨度的增大,斜拉索的倾角减小、拉索数量增多,斜拉索提供的竖向力增大,主塔与主梁的部分梁段所承受的轴力将会显著增大。轴力的提高将会带来强度和稳定两方面的问题。

在强度方面,假如主梁的截面较小,轴向压应力将会非常大。在稳定性方面,主塔附近梁段同时存在整体稳定和局部稳定的问题。为了保证主梁的轴向抗压强度和稳定性,必须采用强度更高的材料或者加大构件截面尺寸。前者对钢材的力学性能提出了更高的要求,后者则会引起桥梁的自重荷载增加,容易导致产生更大轴力的恶性循环。

4.4 斜拉索的振动与阻尼

斜拉索的振动问题近年越来越受到桥梁界的关注。随着大桥跨度的增大,斜拉索的长度也加大,大桥在风作用下会发生振动,而且在风和雨的共同作用下斜拉索还会发生振幅惊人的风雨振。振动会导致斜拉索根部出现反复挠曲,钢丝由于产生挠曲应力而加速疲劳,影响使用寿命。

为了保证斜拉索的可靠性,提高斜拉索的使用年限,必须对斜拉索的振动采取抑制振动的措施。目前,斜拉索风致振动的控制方法可以归纳为机械方法和空气动力学方法。具体的方法有设置锚固装置、斜拉索相互连接、设置阻尼减振器、索表面加工及涂刷不粘水剂等。

4.5 斜拉索的养护及更换

斜拉索养护的目的是保证结构的原有功能不变,能够连续实现正常营运。斜拉索更换的目的是使结构受损部分恢复到设计和正常运营状态。

4.6 新材料的应用

随着跨度的增大,斜拉索的垂度效应、弹性模量非线性等问题越发显著。除了提高设计中理论计算的精确性,研制轻型高强度材料作为斜拉索也是继续提高大桥跨度的有效途径。目前,2000 MPa的平行钢丝已经应用于沪通公铁两用大桥,而2300 MPa级别的钢丝盘条及其拔丝工艺正在研发中。此外,纤维增强复合材料由于具有轻质高强、弹性、耐疲劳、耐腐蚀、比强度大、比模量高以及密度小、有利于标准化规范化施工等特点,也越来越受到桥梁工程界的重视。

4.7 钢材的腐蚀疲劳

大跨度公铁两用大桥在材料上大量使用钢材,腐蚀问题是其发展中面临的一个严峻挑战,特别是在海湾或海峡上修建的桥梁,环境条件更为恶劣,传统钢材的耐腐蚀性将受到严重挑战。钢材在应力腐蚀(疲劳)和腐蚀介质共同作用下会加速腐蚀,且应力越高腐蚀越快。

5 大跨度公铁两用斜拉桥的发展展望

5.1 跨度

国内外的跨海工程已经被列入发展规划中。中国的全

国公路与铁路路网总体规划中,已将跨江河、跨大海大桥纳入建设的行列,例如琼州海峡跨海工程、杭州湾二通道工程、渤海跨海工程、台湾海峡工程等。这就为桥梁技术提出了当规划设计建造更大跨度的大桥时,在通道资源上依据节约与环保的原则,尽可能采用公铁两用大桥;在计算理论和规范参照方面的刚度取值问题、风动稳定性问题、深水基础问题等,也要考虑优先采用公铁两用大桥方案。作为目前世界上跨度最大的公铁两用大桥,重庆朝天门长江大桥和沪通长江大桥的设计、建造与运营经验将会给后续更大跨度公铁两用大桥提供一定的技术参考。

5.2 刚度与稳定性

对于大跨度公铁两用斜拉桥,应建立动力分析模型,结合风-列车-桥梁系统耦合振动分析理论,计算高速列车作用下的风车桥空间耦合振动效应与稳定性,由此分析公铁两用大桥的横竖向刚度指标,并考虑行车安全性、乘坐舒适性并且保证脱轨系数和轮对减载率的容许要求^[15-17]。

5.3 防腐耐久高强高性能新材料的应用

随着大跨度公铁两用斜拉桥跨度的增大,桥梁规模和结构加复杂,对材料要求也越来越高。高强度、高性能、质量轻、韧性好、抗冲击能力强、耐久性好的材料将会被研发继而应用到公铁两用桥梁结构中。斜拉索的垂度效应、弹性模量非线性等问题将会越发显著。因此,除了提高设计中理论计算的精确性,研制轻型高强材料作为斜拉索也是一个继续提高大桥跨度的有效途径。

5.4 施工及运营监测控制的智能化

随着现代科学技术的进步,现代化、工厂化、机械化、装配化、智能化、便携化(传感器、诊断监测仪)、大型智能机器人、卫星监测长大桥的挠度,都将逐步应用到桥梁的科研、设计、施工、管理、监测、养护、维修等一系列现场工作中,以减少人工作业和实现自动化、远程化和无线网络智能监测与管理。

5.5 大跨度桥梁结构与环境及美学共融

随着人们对土木工程与环境和谐相处和桥梁美学的期望,以及规划设计、建桥科学技术的不断提升,人们对于大桥的要求不再停留于满足安全、适用、经济合理的功能需要,将会更加注重桥梁结构所处的环境与美学。因此,未来大跨度桥梁结构将向与环境及美学共融兼具景观美学功能的方向发展。

6 结论

大跨度公铁两用斜拉桥的设计方案,不仅节约了桥位资源、节省了工程投资,同时减小了建桥对环境的影响,对于中国近年大规模基础建设中尤其是在极为紧张的跨海通道建设中面临的节约土地、节约资源的重要课题提供了科学的解决办法。

纵观国内外现代化发展的历史进程,跨海大桥的新规

划、新设计、新体系、新结构、新材料、新工法、新工艺以及新的理论和分析方法,都是由千千万万的桥梁工作者脚踏实地的研发、设计、施工建造以及合理养护维修的工作与大胆的创新精神所创造出来的。大跨度公铁两用斜拉桥将伴随着科学技术的进步,设计理论与计算方法的完善以及施工技术与工法和相应施工装备的升级换代,使桥梁施工与维护也日益精细化、轻便化、自动化、智能化,以减少人工作业,从而使工程质量更好、更耐久,同时推动材料不断向高性能发展。这些积极因素相互作用,可促进跨海通道大跨度公铁两用斜拉桥的持续发展。

参考文献 (References)

- [1] 雷俊卿. 大跨度桥梁结构理论与应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
Lei Junqing. Theory and application of long-span bridge structure[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Tsinghua University. 2015.
- [2] 项海帆, 肖汝诚. 现代桥梁工程六十年[C]//第十八届全国桥梁学术会议论文集: 上册. 上海: 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会, 2008: 6-11.
Xiang Haifan, Xiao Rucheng. Modern bridge engineering sixty years [C]//The 18th National Academic Conference on Bridges the Set: Vol. 1. Shanghai: China Civil Engineering Society Bridge and Structural Engineering, 2008: 6-11.
- [3] 姚玲森. 香港汲水门桥的设计和施工[J]. 国外公路, 1996, 16(2): 18-23.
Yao lingsen. Design and construction of hong kong kap shui mun bridge[J]. Journal of Foreign Highway, 1996, 16(2): 18-23.
- [4] 成井信, 松下贞义, 山根哲雄, 等. 柜石岛·岩黑岛公铁两用大桥的设计[J]. 国外桥梁, 1982(1): 23-55.
Cheng Jingxin, Songxiazhengyi, Shangenzhexiong, et al. Design of iwakurojima and hitsuishijima railroad cable-stayed bridge[J]. Foreign Bridges, 1982(1): 23-55.
- [5] 金增洪. 厄勒桑特桥的设计和施工[J]. 中外公路, 2004, 24(2): 25-29.
Jin Zenghong. Design and construction of Oresund bridge[J]. Journal of the Chinese and Foreign Highway, 2004, 24(2): 25-29.
- [6] 林国雄, 方秦汉, 秦顺全, 等. 芜湖长江大桥设计与关键技术研究[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十三届年会论文集: 上册. 上海: 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会, 1998: 15-29.
Lin Guoxiong, Fang Qinhan, Qin Shunquan, et al. Research on the design and key construction technology of Wuhu Yangtze river bridge [C]// The 13th Annual Meeting Proceedings of Civil Engineering Society Bridge and Structural Engineering Society of China: Vol.1. Shanghai: China Civil Engineering Society Bridge and Structural Engineering, 1998: 15-29.
- [7] 秦顺全. 武汉天兴洲公铁两用长江大桥关键技术研究[J]. 工程力学, 2008(25): 99-105.
Qin Shunquan. Key technology of Tianxingzhou Yangtze river bridge [J]. Engineering Mechanics, 2008(25): 99-105.
- [8] 孙英杰, 消珠海, 徐伟. 郑州黄河公铁两用桥施工控制关键技术研究 [J]. 桥梁建设, 2011(2): 5-8.
Sun Yingjie, Xiao Zhuhai, Xu Wei. Research of key techniques for construction control of Zhengzhou Huanghe river rail-cum-road bridge [J]. Bridge Construction, 2011(2): 5-8.
- [9] 周良, 彭俊, 邓玮琳, 等. 闵浦二桥设计及技术创新[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集: 上册. 上海: 人民交通出版社, 2010: 40-48.
Zhou Liang, Peng Jun, Deng Weilin, et al. Technological and design innovation on No.2 Min Pu bridge[C]//The 19th National Bridge Academic Conference Proceedings: Vol.1. Shanghai: China Communication Press, 2010: 40-48.
- [10] 李卫华, 杨光武, 徐伟. 黄冈公铁两用长江大桥主跨 567 m 钢桁梁大桥设计[J]. 桥梁建设, 2013, 43(2): 10-15.
Li Weihua, Yang Guangwu, Xu Wei. Design of steel girder cable-stayed bridge of 567 m main span of Huanggang Changjiang river rail-cum-road bridge.[J]. Bridge Construction, 2013, 43(2): 10-15.
- [11] 周外男. 铜陵公铁两用长江大桥主桥钢梁架设方案研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(5): 1-8.
Zhou Wainan. Study of erection schemes for steel girder of main bridge of Tongling Changjiang river rail-cum-road bridge[J]. Bridge Construction, 2014, 44(5): 1-8.
- [12] 白慧明. 沪通铁路长江大桥主跨 1092 m 公铁两用大桥方案技术可行性论证[J]. 铁道建筑, 2011(6): 1-4.
Bai Huiming. Technical feasibility of Hutong railroad 1092 m cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2011(6): 1-4.
- [13] 邵长宇. 新世纪中国铁路大桥发展展望[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十四届年会论文集. 南京: 中国土木工程学会, 2000: 66-71.
Shao Changyu. Development prospect Chinese railway cable-stayed bridge in new century[C]// China Civil Engineering Society Bridge and Structural Engineering Conference Proceeding. Nanjing: China Civil Engineering Society, 2000: 66-71.
- [14] 陈忆前. 超大跨径大桥的结构体系[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Chen Yiqian. Structural system of cable-stayed long span cable stayed bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [15] 苗家武. 超大跨度大桥设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Miao Jiawu. Study for design theories of superlong span cable stayed bridge[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [16] 辛学忠, 张玉玲, 戴福忠, 等. 铁路列车活载图式[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 31-36.
Xin Xuezhong, Zhang Yuling, Dai Fuzhong, et al. Railway train live load pattern[J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 31-36.
- [17] 李小珍, 强士中. 大跨度公铁两用斜拉桥动力分析[J]. 振动与冲击, 2003, 22(1): 6-9.
Li Xiaozhen, Qiang Shizhong. Dynamic analysis of long span railroad cable-stayed bridge[J]. Journal of Vibration And Shock, 2003, 22(1): 6-9.
- [18] 李小珍. 高速铁路列车-桥梁系统耦合振动理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
Li Xiaozhen. Theory and application research high-speed trains of train-bridge coupling vibration[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000.
- [19] 徐恭义. 千米级跨度铁路桥梁的受力性能研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 56-60.
Xu Gongyi. The stress performance study of railway bridge exceed 1000 meter[J]. China Railway Science, 2011, 32(2): 56-60.
- [20] 陈克坚, 李永乐, 李龙, 等. 大跨度铁路钢桁梁大桥刚度设计及取值研究[J]. 铁道工程学报, 2014(3): 67-71.
Chen Kejian, Li Yongle, Li Long, et al. Research on the stiffness design and its value for long span railway steel truss cable-stayed bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(3): 67-71.
- [21] 徐茂凯. 碳纤维复合材料斜拉索的发展[J]. 纤维复合材料, 2010(3): 29-31.

- Xu Maokai. The development of carbon fiber reinforced plastic cables [J]. Fiber Composite, 2010(3): 29-31.
- [22] Mallick P K. Ultimate possibility in long span bridging[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(11): 2547-2560.
- [23] Dan M F, Imai K. Reliability of long span bridges based on design experience with the Honshu-Shikoku bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3-5): 373-392.

Study on long-span rail-road cable-stayed bridge for cross-sea channel

LEI Junqing, HUANG Zuwei, CAO Shanshan, LIU Haosu, GUI Chengzhong

School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Resource conservation and environmental protection need to be considered most when it comes to cross-sea bridge. Long-span rail-road cable-stayed bridge is a primary choice for cross-sea bridge, which shows advantage in saving channel resources. According to the investigation on long-span rail-road cable-stayed bridges which are existing or under construction worldwide, some key technologies are addressed. At the same time, research on durability of steel girder and stayed cable is conducted, in which a contrastive analysis on structural systems and arrangements is carried out on the basis of structural features of long-span rail-road cable-stayed bridges. Solutions to the problem to further increase the span of long-span rail-road cable-stayed bridge are also put forward. Results of this paper could be taken as technical reference for the design of the same type of cross-sea bridges.

Keywords cross sea channel bridge; rail-road bridge; long-span cable-stayed bridge; structural system; bridge durability

(责任编辑 韩星明)