

海鸥式钢箱拱桥设计关键技术

曹发辉, 郑旭峰, 梁 健

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要:柳州广雅大桥主桥采用跨径 $63\text{ m}+2\times 210\text{ m}+63\text{ m}$ 的海鸥式钢箱拱桥, 结构体系采用刚架系杆拱桥, 有别于常规拱桥, 拱肋之间未设横撑并设置了副拱, 凸显组合体系拱桥的特色及受力复杂性。从结构设计构造及关键技术等方面详细介绍了该桥的设计思路和特点。

关键词: 钢箱拱; 三角刚架; 刚架系杆拱; 组合体系; 稳定

中图分类号: U448.22+3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)01-0071-04

1 概 述

柳州广雅大桥位于柳州市区, 连接柳江市中心城区与河西片区^[4], 大桥地理位置处于柳州市中心城区的特点决定了其景观效果的重要性, 根据桥型美观实用的原则, 采用中承式海鸥造型的钢箱拱桥桥型方案(见图1)。



图1 计算模型简图

大桥全长 1 058 m, 主桥为双孔中承式钢箱拱桥, 长 546 m, 引桥为预应力混凝土连续梁。主桥桥面宽度为 36 m, 桥面布置为双向六车道和两侧人行道。该桥拱肋之间除桥面位置处未设置任何横向风撑, 同时在常规的飞燕式拱桥基础上增设副拱连接主拱与边拱, 造就了整座大桥空灵剔透、轻盈优美的选型特点, 具有独特的结构和审美特色。

2 结构设计

2.1 总体设计特点

广雅大桥主桥全长 546 m, 孔跨布置为 $63\text{ m}+2\times 210\text{ m}+63\text{ m}$, 桥梁总体布置见图2。本桥桥宽 36 m, 根据桥梁外观造型及结构需要, 横向合理地采用双拱肋布置方案, 见图3。为解决无风撑钢箱拱

的稳定问题, 桥面结构不采用漂浮体系, 而将主拱圈设置于人行道和车行道之间, 主拱圈与桥面结构进行交叉固结以提高其整体刚度, 主拱、边拱与桥面主纵梁形成一刚度较大的三角刚架, 并利用水平系杆平衡大部分水平推力, 因此本桥的结构体系属于刚架系杆拱桥。

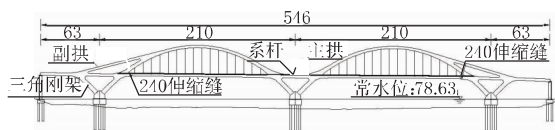


图2 桥孔布置图(单位: m)

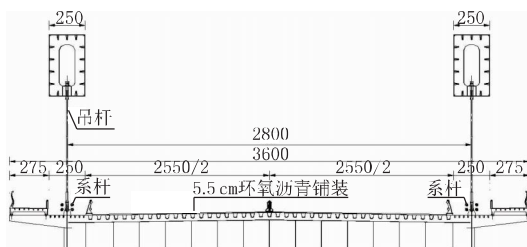


图3 主桥断面(单位: cm)

为释放桥面连续而产生的巨大水平力^[5], 主梁设 2 道 240 型伸缩缝, 位于边墩三角刚架端部与中跨桥面加劲梁之间, 该三角刚架端部设牛腿构造, 中跨加劲梁端部通过拉压支座搁置于牛腿上。

2.2 主拱与三角刚架

主跨拱圈为变截面悬链线钢箱拱, 钢箱拱肋采用单箱单室截面, 双孔连拱体系, 主跨的组合跨径为 210 m, 净矢跨比 $1/4$, 拱轴系数 $m=1.6$; 为适应拱肋内力的变化, 截面高度从拱脚的 4.5 m 渐变至拱顶的 2.5 m, 采用沿水平方向 1.5 次抛物线的变化规律。钢箱拱肋宽度综合考虑无横撑的稳定要求及景观需要采用 2.5 m, 钢箱的面板厚为 28~40 mm; 副拱高 2.5 m, 宽度与主拱同宽 2.5 m, 拱箱面板厚 20 mm。

如 2.1 节所述, 本桥采用刚架系杆拱桥体系, 三

收稿日期: 2020-05-05

作者简介: 曹发辉(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

角刚架相当于与上部系杆拱桥固结的三角刚构桥墩,其斜腿部分为主跨拱圈的延续,对于两边的三角刚架而言,边跨侧的斜腿与主跨侧斜腿呈对称布置。斜腿截面尺寸即为钢箱拱桥面以下部分的尺寸,与桥面梁交界处设箱型肋间横梁,以将横向两片三角刚架连成一体,承担整个上部结构的恒、活载并维持结构的稳定。肋间横梁高和宽均3 m,与桥面正交异性板共用顶板。

为提高三角刚架防船撞性能,斜腿钢箱从拱脚至最高通航水位以上2.5 m的位置灌注C50自密实微膨胀混凝土,同时内灌混凝土作为拱脚钢箱与拱座钢混凝土过渡全断面承压连接(在拱脚与拱座之间张拉预应力钢束)的需要。

2.3 加劲梁

无风撑拱圈的稳定须征询桥面结构的轻型化,因此在对比了结合梁桥面板、混凝土桥面板以及钢桥面板后,确定桥面结构采用开口式的纵横梁格正交异性板,截面采用双主纵梁形式,见图3~图5。采用底板开口的正交异性板相对于全封闭钢箱梁具有以下优点:一、可以最大限度地根据结构的实际受力需求来设计各板件尺寸,从而节约钢材;二、便于制造与安装;三、底板开口后可大大改善通风条件,与密不透风的钢箱梁相比,大大降低了钢桥面铺装由于夏季高温所带来的热稳定性方面的病害。

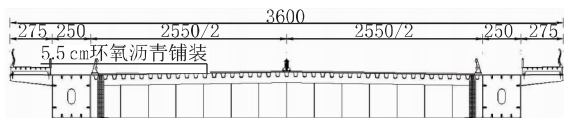


图4 主桥断面(单位:cm)



图5 桥面加劲梁照片

在边跨与三角刚架区段由于跨径较大,且对应于钢箱拱的截面形式,主纵梁采用与钢箱拱同宽的闭合箱形截面(见图4)。而中跨吊杆区域的主纵梁则采用工字梁形式(见图3),具有节约钢材,便于制造、运输和架设以及养护的优点。横梁除肋间横梁采用刚度较大的箱形外,其余一般部位采用工字形梁,横梁间距3 m。

2.4 吊杆与系杆

吊杆采用可调可换的19根环氧涂层钢绞线整束挤压式吊杆,吊杆纵向间距9 m,上端吊点构造采用钢锚箱的形式(见图3),下端吊点构造采用耳板销接式以方便养护检查(见图6),且可解决短吊杆转角较大而引起的疲劳损伤问题。系杆索采用4束(单侧)37根环氧涂层钢绞线整束挤压式系杆体系以提高其耐久性,并方便维护和更换,两端通过设置钢锚箱锚固于三角刚架节点的异形钢箱处(见图7),系杆锚箱上方采用水密门进行密封。

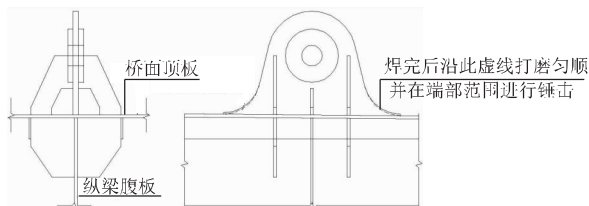


图6 桥面加劲梁照片

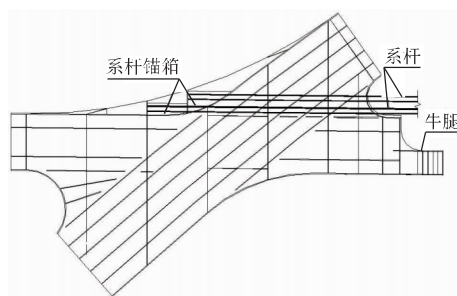


图7 桥面加劲梁照片

3 结构设计特色

柳州广雅大桥桥型独特,造型新颖,是刚架系杆拱与梁拱协作体系有机融合而成的一种组合体系拱桥,结构线形流畅,充分体现了一种简洁的美。参照本桥结构传力体系见图8,可看出本桥结构体系设计的主要构思和特点有:

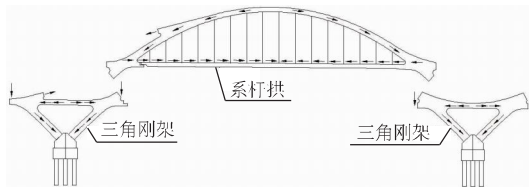


图8 结构体系传力示意图

(1)主跨为三角刚架与下承式系杆拱桥的组合体系,三角刚架的存在,减小了钢箱拱的跨度(钢箱拱的有效跨度由203 m变为150 m),增大了结构的跨越能力,三角刚架可理解为与上部系杆拱固结的下部结构(三角刚构桥墩),其优点是抗推刚度大,施工和运营中起到抵抗边、中跨不平衡内力的作用^[5,6];相对于一般的拱桥具有较好的抗震及防船撞性能^[1]。

(2)本桥属于梁—拱协作体系。钢箱拱的副拱对边跨起到支承作用从而增大了边跨跨越能力,造就

了连绵起伏、造型美观的双拱轮廓线;副拱和主拱以及三角刚构形成了稳定的桁架体系,可改善拱脚部位的受力进而减小了拱圈截面,改变了常规拱桥粗大的拱体造型从而造就了大桥一种空灵剔透、独特新颖的景观特点。

(3)本桥把以上两种体系进行有机的创新组合,同时采用双主跨的连拱体系,进而形成了一新型的、不同于一般飞燕式拱桥的组合体系。

(4)出于景观需求,本桥桥面以上的拱肋之间未设横撑,避免了横撑所带来的杆件凌乱的缺点,具有桥型优美、行车视野宽阔的优点,且通过避免设置额外横撑可将材料充分利用到改善结构静力行为上,因为横撑除了增强结构的稳定性外别无他用,将横撑的材料应用到拱本身除提高稳定性外还可提高结构刚度及承受恒活载的能力。

4 结构设计关键技术

4.1 异形节点钢箱设计

本桥梁拱交叉异形节点的设计是一个难点,三角刚架的桥面梁及拱肋均为单箱单室,两者相交处形成异形节点,对面板贯通和面板连通方案(见图 9、图 10)进行了研究比选工作。所谓面板贯通是指拱箱顶底板从拱脚到拱顶一直贯通,穿过箱形主纵梁;主纵梁的箱梁顶底板在拱箱外截断不贯通,与钢箱拱的顶底板直接焊接,拱箱内对应于主梁纵箱顶底板的位置设水平横隔板,保证主纵梁的水平传力,拱和梁的侧腹板采用异形的整块板。面板连通方案的侧腹板与贯通方案相同,但其余面板都不贯通,而是采用倒圆处理连通起来与侧腹板形成一个带有四肢的箱型空腔。

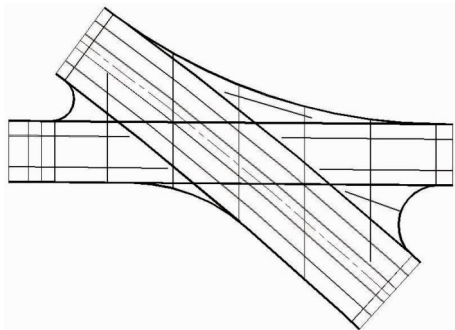


图 9 面板贯通方案

有限元分析表明两种节点构造方案在受力上都是安全可靠的;钢材用量方面,面板连通方案略少;对于制造工艺和构造方面,面板贯通方案焊缝较多而集中,且由于三角刚架纵梁承担了刚性系杆的作用,因此纵梁与箱拱之间的焊缝始终处于受拉状态,另外此焊缝连接为锐角形式,在活载的交替作用下

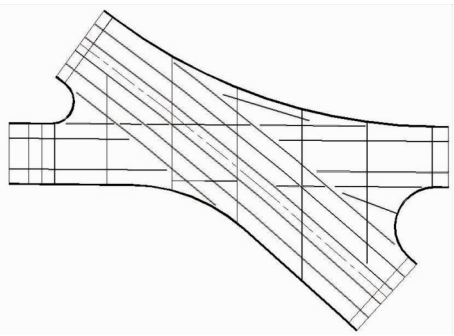


图 10 面板连通方案

存在疲劳隐患,而面板连通方案的焊缝集中及疲劳的问题相对较小。因此综合比选后最终确定采用面板连通方案。

异形节点设计的另外一个难点是在进行总体计算时采用单主梁模式无法准确的模拟结构实际刚度和重量,因此在总体计算建模时采用了梁单元和板单元混合有限元法(见图 11),桥面系和异形钢箱采用板壳单元进行模拟,桥面系的纵横格子梁及拱肋等采用梁单元,异形节点板壳单元与梁单元之间采用刚性连接的方式实现衔接过渡(见图 12),图 13 为节点的 Von Mises 屈服应力图,最大应力为 150 MPa,位于倒圆角附近,其他部位应力均较小,一般不超过 100 MPa。采用混合有限元方法既可以弥补梁单元模型无法计算构件局部受力的不足,又可克服局部板壳模型无法准确模拟其边界条件和边界力的缺点,计算可靠性和计算效率都得以提高。

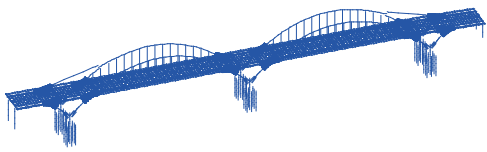


图 11 计算模型

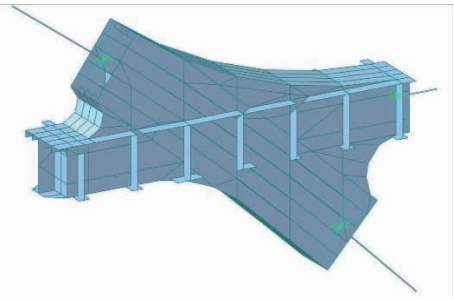


图 12 异形节点计算模拟

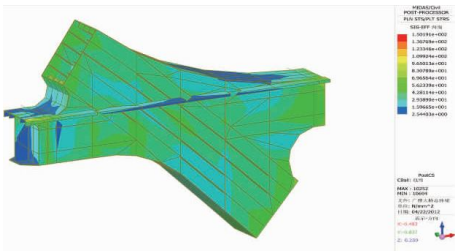


图 13 异形节点计算结果

4.2 伸缩缝的设置

由于三角刚架抗推刚度较大,且本桥为三个刚架的双孔连拱体系,在桥面结构连续的情况下,桥面梁在温差作用下会产生巨大的水平力,从而使得三角刚架受力严重不均及基础的水平力过大,因此须考虑梁体设置伸缩缝以释放温度力。由于中跨和三角刚架段的主纵梁截面形式不同,因此首先考虑主桥中间设置4道伸缩缝,均位于中跨桥面梁的两端,但伸缩缝过多会降低行车舒适性,且对于正交异性板,伸缩缝位置处较难养护;另外须在中跨桥面梁的两端设置阻尼器以解决地震力作用下的纵向漂移问题。因此优化为只设置2道伸缩缝,但涉及到中跨工字形主纵梁与三角刚架箱形主纵梁的过渡连接问题,经过分析研究后在三角刚架箱梁端部增设一道中央纵腹板与工字形纵梁的腹板进行连接,增设的纵腹板两侧设置三道横隔板与箱形纵梁边腹板连接,以完成竖向剪力向边腹板的传递,并在异形钢箱内与加劲肋倒圆衔接,使得应力扩散均匀过渡。

伸缩缝设置后,主墩基础所受水平推力大大减小,同时结合主拱合龙前的起顶与压重,使得基础受力更加均匀,最终形成对主墩基础只有很小水平推力和弯矩的拱桥^[7],大大降低了基础工程的规模和造价,使拱桥基础更为轻巧。

伸缩缝的设置对结构稳定也有影响,经计算伸缩缝设置4道和2道时的稳定系数分别为8.4和10.3,伸缩缝个数对稳定有影响的根本原因在于吊杆的非保向力效应—吊杆和桥面系对拱肋面外变形有着约束作用,而吊杆非保向力作用的大小又与桥面刚度有关,伸缩缝减少后相当于桥面系的整体刚度得到了提高,从而使结构稳定性也得以提高。

4.3 结构稳定研究

本桥由于主拱圈之间不设置横撑,因此其稳定成为重中之重的问题,除了采用适度增加拱肋横向宽度以及钢箱拱面板壁厚的措施以增加拱圈的横向刚度外,还从以下几个方面来提高结构稳定性:一、充分利用三角刚架、拱梁固结和设计副拱等构造,提高桥梁整体刚度,在两片钢箱拱之间桥面位置处设置刚度较大的肋间箱形横梁,并采用整体桥面系,减少伸缩缝个数,可充分利用吊杆的非保向力效应,从而大大提高了拱的稳定。对于吊杆非保向力提高拱肋面外稳定的效果,按以下方法进行了论证:首先对桥面以上的拱肋考虑采用裸拱模型进行分析,将桥面的恒活载所产生的吊杆力作为集中力施加于拱肋上,经计算稳定系数为5.9,与考虑桥面系的整体模

型的稳定系数10.3相比,可看出吊杆非保向力效应对拱的稳定提高可达75%。二、本桥为景观需要而设置的副拱同时也可提高主拱的稳定性。有无副拱两种工况下稳定系数分别为10.3和9.6,由此可见副拱的设置对主拱圈的稳定具有一定的贡献,其原因在于本桥不像设置横撑的拱桥主要依靠设置横向风撑来减小拱圈的自由长度从而提高其而外稳定性,而是靠自身横向刚度来保证面外的稳定,副拱的存在对主拱提供了部分横向刚度,从而提高了主拱的稳定性。三、尽量减小初偏心、初曲率等初始缺陷对拱肋横向稳定的影响,在大桥的施工过程中对钢箱拱的横向偏位严格按照 $\pm 1\text{ cm}$ 的误差进行控制。

本桥除进行了线弹性稳定分析外,同时研究了考虑材料非线性和几何非线性的第二类稳定问题,材料非线性采用Mises屈服准则和双线性的应力应变曲线模拟;几何非线性的分析考虑了拱顶 $L/800$ 的横向偏差,并按一阶弹性屈曲模态进行分布作为初始缺陷,计算时考虑横向风载的影响,经计算弹塑性稳定(极限承载力)安全系数为3.6。

5 结 语

柳州广雅大桥位于柳州市区,除具有交通功能外,还应具有较好的建筑特点。桥梁结构充分利用三角刚架、拱梁固结和设置副拱等构造,提高桥梁整体刚度,保证横向稳定与动力性能而取消设置横撑,既保证了桥梁安全性和经济性,又提高了桥梁行车的通透性和观赏性,成为柳州市的重要景点。

通过对结构受力体系和构造的设计优化,达到力学与美学的结合统一,是城市桥梁的设计理念。对于中承式钢箱拱桥,充分利用桥面结构作为拱肋之间的横撑,采用刚架系杆拱桥与设置副拱的梁—拱协作体系拱桥的复合体系结构,既可使各构件材料得到充分的利用,同时解决拱的稳定和改善结构的静力行为,又可避免设置额外的横撑,达到结构轻巧、造型美观的目的,但对结构体系应进行充分的研究和优化,并进行详尽的计算分析,使之受力更趋于合理。

参考文献:

- [1] 牟廷敏,范碧琨,梁健,等.大跨拱梁协作体系的创新实践[C]//四川省公路学会桥梁专委会2007年技术交流会论文集,成都:电子科技大学出版社,2007.
- [2] 上海市建设和管理委员会科学技术委员会.卢浦大桥工程[M].上海:上海科学技术出版社 M2004.
- [3] 覃杰.新光大桥关键施工技术[M].重庆:重庆大学出版社,2009.
- [4] 黄家建.柳州市广雅大桥设计[J].世界桥梁,2014,42(1):6-11.

计方案中已经采用了最小竖向间距,布置合理。

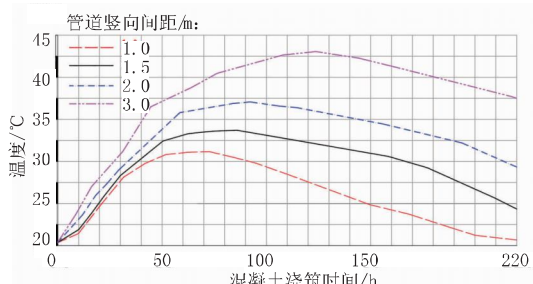


图 10 不同管道间距下温度变化过程

3.5 推荐方案与规范符合性分析

经上述分析,认为设计方案(采用埋设冷却水管方案,水冷管采用直径 40 mm 钢管;水冷管通水时间为 10 d,冷却水管流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,竖向间距设为 1.0 m)即为最优推荐方案。推荐方案计算结果符合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)要求,分析过程如下:

(1)最大应力。设置冷却水管后,由于冷却管有效减小了混凝土内部温度,从而大幅减小了混凝土内部应力,最大应力由 2.39 MPa 减小为 0.66 MPa,满足规范中小于 1.52 MPa 的临界要求。

(2)混凝土裂缝比率(法向)。法向裂缝比率 = 输出容许应力 / 产生应力,在保证通水的情况下裂缝比率最小值应大于 1.0。经计算,实例工程在 220 h 时,承台混凝土法向裂缝比率最小值为 5.0,满足要求。

混凝土法向裂缝比率分布云图见图 11。

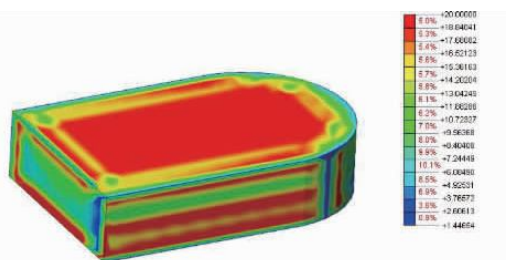


图 11 承台混凝土法向裂缝比率分布云图

4 结 语

(1)配置冷水管后,混凝土内温度明显变均匀,降温效果明显,混凝土内外最大温差由 28.8°C 下降至 15.2°C ,减少了 13.6°C ;最大应力由 2.39 MPa

下降至 0.66 MPa。

(2)冷却水通过量和管径增大对混凝土温度下降作用十分微弱,且管径增大会影响混凝土结构整体性。

(3)减小管道竖向间距可以有效降低混凝土温度,小间距的冷水管竖向布置降温效果明显,在工程造价、设备性能允许且保证混凝土整体稳定性的前提下,应尽可能减小管道竖向间距。

(4)经研究,设计方案的排水管布设为最优方案。在设计工况下,混凝土内部最大温度为 26.8°C ,最大应力为 0.66 MPa (满足小于 1.52 MPa 的规范要求),且混凝土法向裂缝比率均大于 5.0 (满足规范大于 1.0 的要求),说明设计方案合理、可行。

参考文献:

- [1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [2] MUHAMMAD N A, KIM J-S, LEE Y, et al. Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 39: 154-164.
- [3] KRAJČINOVIE D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 18(7): 551-562.
- [4] HILLERBORG A, MODEER M. Analysis on crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 6: 773-782.
- [5] 李杰,张其云.混凝土随机损伤本构关系[J].同济大学学报(自然科学版),2011,29(10): 1135-1141.
- [6] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].第2版.北京:中国水利水电出版社,2012.
- [7] 李庆斌,卿龙邦,管俊峰.混凝土裂缝断裂全过程受黏聚力分布的影响分析[J].水利学报,2017,43(1): 31-36.
- [8] 高杰.福州琅岐闽江大桥承台大体积混凝土水化热分析与温控研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [9] BANERJEE S, MULESHKOV A. Analytical solutions for steady seepage into double-walled cofferdams [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 118(3): 525-539.
- [10] SUNIRMAI B. Design charts for double-walled cofferdams [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 119(2): 214-222.
- [11] 刘沐宇,汪峰,丁庆军.双掺粉煤灰和矿粉大体积混凝土水化放热规律研究[J].混凝土,2010(1): 21-26.
- [12] 熊华飞.一次性浇筑厚尺寸承台大体积混凝土温控防裂研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [13] 高学振.大跨径连续刚构桥零号块水化热温度效应及温控措施研究[D].西安:长安大学,2015.

(上接第 74 页)

- [5] 李跃,罗申生,张健峰,等.广州新光大桥建设概况[J].中外公路,2007,27(1): 86-91.
- [6] 唐康.海鸥式刚架系杆拱桥拱脚刚结点应力优化研究[D].四川成

都:西南交通大学,2010.

- [7] 徐升桥,任为东,刘春彦.新光大桥的设计与施工[J].铁道勘察,2007(21): 63-71.