

文章编号: 1674 - 599X (2009) 02 - 0040 - 06

钢腹杆 - 混凝土新型组合箱拱桥试设计

韦建刚^{1,2}, 牟廷敏³, 缪 锋², 彭桂瀚², 陈宝春²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

3. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院 桥梁分院, 四川 成都 610041)

摘 要: 介绍了大跨度混凝土拱桥的发展现状, 提出了用钢腹杆代替混凝土箱拱截面中的混凝土腹板, 形成钢腹杆混凝土新型组合箱拱桥的构思. 介绍了钢桁腹杆混凝土组合结构在梁桥中的应用情况. 以主跨 160 m 的福建宁德岭兜混凝土拱桥为结构原型, 进行了钢腹杆混凝土组合拱桥的试设计, 并采用有限元方法进行了结构计算分析. 结果表明, 试设计桥梁满足设计要求且较混凝土拱桥减小拱圈自重约 32%. 初步研究表明, 钢腹杆混凝土组合箱拱通过减轻自重, 减小了拱圈内力, 有利于悬臂施工, 可提高抗震性能, 是一种具有应用前景的新型组合拱结构.

关键词: 桥梁工程; 混凝土拱桥; 钢腹杆; 岭兜大桥; 试设计

中图分类号: U442 **文献标识码:** A

Trial-design on new-type composite box arch bridge with steel truss webs and concrete flanges

WEI Jian-gang^{1,2}, MU Ting-min³, MIAO Feng², PENG Gui-han², CHEN Bao-chun²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil

Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Branch Courts of Bridge, Design and

Research Institute of Highway Planning and Surveying of Sichuan, Chengdou 610041, China)

Abstract: Development of concrete arch bridges is introduced. By replacing the concrete webs to steel truss webs, a new-type composite box arch bridge with steel truss webs and concrete flanges is proposed. The application of the prestressed concrete girder bridges with steel truss webs is presented. Taking Lingdou Bridge in Ningde as a prototype, a trial-design of this new type arch bridge is carried out and its structural analysis is performed by finite element method. The results show that the trial design of the new composite arch bridge can meet the design requirement and itself weight is below 32% compared to the concrete arch ring. The initial researches in this paper indicate that caused by decrease of the self weight of the arch ring, the internal forces are reduced, and it is a favor to cantilever construction and enhancement of the re-seismic property. Therefore, composite box arch bridge with steel truss webs and concrete flanges is a new type composite bridge which has a good foreground of application in bridge engineering.

Key words: concrete arch bridge; steel truss web; Lingdou Bridge; trial design; finite element method

收稿日期: 2009 - 01 - 01

基金项目: 福建省国际合作重点项目 (2008 D018); 福建省科技厅资助项目 (JA07014)

作者简介: 韦建刚 (1971 -), 男, 福州大学副研究员, 博士.

1 概述

混凝土拱桥曾在相当长的时期内处于我国主导桥型的地位,修建的数量较多.在世界 41 座跨径不小于 200 m 的混凝土拱桥中,我国占有 8 座,数量最多;另外 17 个国家中,日本有 6 座,克罗地亚有 5 座,葡萄牙和西班牙各有 3 座,法国、德国和奥地利各有 2 座,其他 10 个国家共有 10 座.跨径大于 300 m 的桥梁中,中国占了一半,跨径的排名分别为第 1, 3, 5 名.这 41 座混凝土拱桥全部是有推力拱的,其中 34 座以上承式为主,主拱为箱形截面^[1].这与钢管混凝土拱桥以中、下承式为主且有大量的无推力拱不同,混凝土拱桥的自重较大,对地形、地质条件要求也更高,主要出现在国土中含山区、海岛面积较大的国家.

从数量上看,近 20 年来大跨度混凝土拱桥修建的数量最多,尤其是近 10 年(1999 年以来),世界上跨径不小于 200 m 的大跨度混凝土拱桥,共修建了 14 座,然而,其中我国仅 2 座,仅占总数的 14%.相对于国外和国内其他桥型来说,近些年我国混凝土拱桥的修建偏少.

在我国,山地与海岛的面积都很大,混凝土拱桥有着广阔的应用前景.然而,随着高强、大跨索结构的发展,拱桥的大跨度能力的优势已相对下降.在跨径超过 300 m 的桥梁中,一般情况下斜拉桥具有更强的竞争能力.而在 200 m 跨径以下,现代预应力连续刚构因其设计简单、施工方便、快速而受到欢迎.因此,混凝土拱桥的竞争能力已较过去有很大的削弱.混凝土拱桥的应用发展有赖于技术的创新^[2].

借鉴预应力混凝土梁中用钢腹板代替混凝土腹板的组合结构,福州大学提出了钢腹板混凝土组合拱的新桥型构思,初步的研究表明,这种新桥型具有很好的应用前景^[3-5].“钢腹板混凝土组合箱型拱桥研究”已获 2008 年西部交通建设科技项目资助,将这种新桥型应用于实际桥梁中的研究正在进行之中.

在本研究中,先综述了钢腹杆在预应力混凝土组合梁桥中的应用.接着,以福建宁德岭兜大桥为原型,采用钢桁腹杆代替混凝土腹板形成钢腹杆混凝土组合拱,开展了钢腹杆混凝土组合拱的试设计研究,以探讨这种新桥型的可行性.

2 钢腹杆在桥梁中的应用

钢桁腹杆混凝土组合梁是用钢桁架代替 PC 箱梁中的混凝土腹板形成钢-混凝土组合断面的梁(如图 1 所示),其中钢桁腹杆可能承受拉力,也可能承受压力.在实际应用可采用型钢,而更多的则采用钢管.采用钢管作为钢桁腹杆时,可在受压钢桁腹杆中灌注混凝土,使其成为钢管混凝土构件,从而提高受压钢桁腹杆的抗压能力.也可以根据需要对受拉弦杆施加预应力,以降低其拉应力水平,甚至可使之维持在压应力状态^[6].

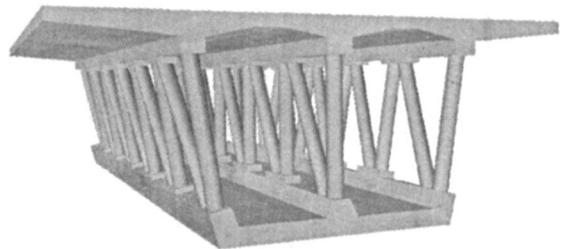


图 1 钢腹板混凝土组合梁示意

Fig 1 Composite beam with steel truss webs

与波形钢腹板组合截面相比,钢腹杆组合截面中,采用型钢或钢管作为腹板,其屈曲临界荷载远大于波形钢腹板,因此,钢腹杆组合箱形截面形式可适用于截面高度较大的连续梁、连续刚构等桥梁.同时由于其钢腹杆中的“镂空”结构,可减少风力作用,较波形钢腹板截面有较强的抗风性能,因此,也可将钢腹杆组合箱形截面形式应用于斜拉桥、悬索桥等其他桥型中.由此可见,钢腹杆 PC 组合结构形式是一种具有发展前景的桥梁新结构.

钢腹杆 PC 组合梁构思最早由法国工程师提出并开展了研究^[7].1985 年,法国建成了第一座钢腹杆 PC 组合梁桥——Arbois 桥.在此后相继建成的几座同类桥梁中,最具有代表性的是 1997 年底架设完成的 Bouonnais 高架桥.该桥用钢管斜腹杆形成空间桁架,用密接匹配法预制节段架设,预制和架设方法与一般 PC 箱梁相同,拼装时无钢接头.该高架桥为等截面结构形式,外形美观,成了当地的一大景观.在较大跨径的桥梁中这种结构由于减小自重带来了较好的经济性,如: Bouonnais 高架桥与一般的 PC 箱梁桥相比可减轻重量 40%.

本研究中收集到的钢腹杆组合箱梁桥桥例^[8-14]见表 1.从表 1 中可以看出,钢腹杆 PC 混

混凝土组合箱梁桥既有连续梁桥,又有连续刚构桥和单跨刚架桥,截面由等高度变为变高度.施工技术日趋完善,除了悬臂浇注和悬臂拼装施工外,瑞士的 Dreirosen 桥还采用了劲性骨架施工.

表 1 钢腹杆 PC 组合箱梁桥
Table 1 Bridge of composite box beam with steel truss webs

序号	所在国家	桥名	桥型	最大跨径 /m	建成年份	施工方法
1	法国	Arbois 桥	3 跨连续箱梁	40.4	1985	悬臂现浇
2	法国	Boubnais 桥	3 座高架桥组成	110	1997	悬臂拼装
3	法国	Bras de la plaine 桥	单跨刚构桥	280.773	2001	悬臂现浇
4	德国	Nantenbach 铁路桥	6 跨连续箱梁桥	60	1993	悬臂拼装
5	瑞士	Dreirosen 桥	3 跨连续梁桥	105	2004	劲性骨架
6	日本	Kinokawa 桥	4 跨连续梁桥	85	2003	悬臂现浇
7	日本	Shitsumi 桥	4 跨连续梁桥	75	2005	悬臂现浇
8	日本	Sarutagawa 桥	6 跨连续刚构桥	110	2006	悬臂现浇
9	日本	Tomogawa 桥	5 跨连续刚构桥	119	2006	悬臂现浇
10	葡萄牙	Europe 桥	斜拉桥	186	—	悬臂拼装

3 钢腹杆混凝土组合拱试设计

3.1 试设计的构思

钢腹杆混凝土组合拱基本结构形式是以现有的混凝土拱的结构形式为基础,截面以多室箱箱

形为主,由竖腹和斜腹杆组成的钢桁腹杆结构代替厚重的混凝土腹板.腹杆:采用型钢或钢管构件;主拱:施工方法与钢腹杆 PC 梁桥相似,采用悬臂现浇或悬臂拼装的方法;节点:借鉴梁式桥中的构造.

由表 1 分析可知,钢桁腹杆 PC 组合梁结构应用于大跨径结构为主.但作为钢腹杆混凝土组合拱的首次试设计研究,是以中等跨径的福建宁德岭兜大桥(主跨 160 m)为结构原型.这也符合将来可能的试验桥从小到大、稳重推进的应用研究路径.

3.2 试设计概况

岭兜大桥全长 329.5 m,桥面宽度为净 9 m (车道) + 2 × 0.5 m (人行道).设计荷载为汽车 - 超 20 级,挂车 - 120,设计地震基本烈度为 Ⅵ 度,按 Ⅵ 度构造设防.主跨:采用上承式的钢筋混凝土悬链线箱形拱,净跨径为 160 m,净矢高为 1/4,拱轴线为悬链线,拱轴系数为 2.114^[15].

钢桁腹杆 - 混凝土组合拱桥试设计中,只改变了拱圈的截面形式和拱轴线系数,其他参数不变.总体布置如图 2 所示,主拱圈截面形式如图 3 所示.主拱圈截面高为 2.4 m,宽为 8.0 m,顶、底板均为钢筋混凝土,采用钢桁腹杆.中箱宽为 4.0 m,边箱宽为 1.75 m,顶底板混凝土厚 25 cm.钢桁腹杆:采用 $\phi 219 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的 Q345 钢管,布置形式为平行式,即与水平线垂直,直腹管的一般间距为 2.6 m,在拱顶位置的间距为 1.54 m,而斜腹杆与直腹杆的交角为 $30^\circ \sim 60^\circ$;采用同一管径和壁厚.

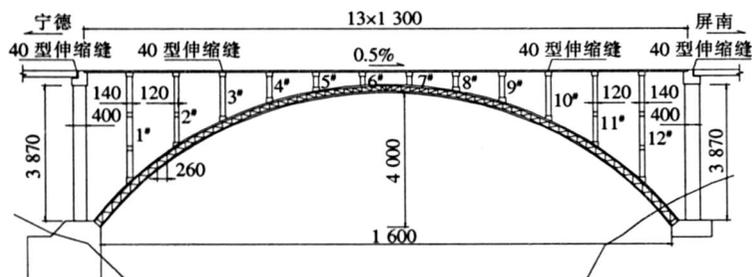


图 2 试设计钢腹杆混凝土组合拱桥总体布置(单位:cm)

Fig. 2 General arrangement of composite box arch bridge with steel truss webs by trial design(unit:cm)

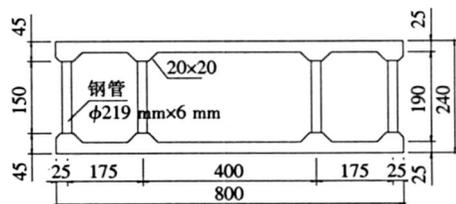


图 3 试设计主拱圈构造(单位:cm)

Fig. 3 Cross-section of arch ring in trial design(unit:cm)

采用钢桁腹杆代替混凝土腹板后,拱圈重量发生了较大变化,这就需要重新确定合理拱轴系

数.参照原桥的拱轴系数 ($m = 2.114$),分别选取拱轴系数 $m = 2.200, 2.114, 2.050, 2.000, 1.900$

和 1.850 的悬链线拱轴进行有限计算分析,计算结果列于表 2 可见,当拱轴系数为 2.050 时,恒载压力线与拱轴线的最大偏离为最小,故选择钢桁腹杆混凝土组合拱桥的悬链线拱轴系数为 2.050.

表 2 恒载压力线与拱轴线的最大残差

Table 2 Max difference value between permanent load pressure line and arch axis line

拱轴系数	最大偏离值 /m	拱轴系数	最大偏离值 /m
2.200	0.035 6	2.000	0.023 9
2.114	0.027 7	1.900	0.024 7
2.050	0.023 6	1.850	0.025 1

钢桁腹杆的节点埋在混凝土内,通过连接件与顶底混凝土板紧密联结在一起.为保证它们能够共同受力,连接件应具有一定的强度和精准的定位性能.试设计所采用的连接件有两种,一种用于一般节点,如图 4(a)所示,该连接件由两个钢环和中间连接板构成,它具有快速安装定位的优点,只需将钢桁腹杆嵌入两个钢环内即可完成,两个钢桁腹杆之间具有一定的孔隙,这是基于方便施工安装以及耐久性能的考虑.另一种连接件用于受力较为复杂的节点处,如:拱脚、立柱下的拱圈截面等,其构造如图 4(b)所示,该连接件加强了节点板,通过穿过预设在节点板上圆孔的钢筋和销钉,使得钢腹管与混凝土更好地联结在一起,加强了节点的强度和延性性能^[14].

3.3 试设计桥结构计算

利用桥梁专业有限元分析软件 Midas 分别建立岭兜大桥原混凝土拱桥和试设计的钢桁腹杆混凝土组合拱桥的计算模型,进行荷载内力计算,结果列于表 3、4(表中轴力以受压为正,弯矩以下缘受拉为正).

恒载作用下原桥和试设计桥的拱圈内力计算结果见表 3(表中 M 为弯矩, N 为轴力).与原桥相比,试设计桥拱圈各截面在自重作用下轴力都显著降低,拱顶轴力比原桥减小了 24%;拱脚轴力与原桥相比,降低了 24%.

温度效应作用下原设计和试设计的拱圈内力计算结果见表 4,温度效应按升、降温 15 考虑.从表 4 中可知,钢桁腹杆混凝土组合拱桥在温度作用下的产生内力比原桥要小,拱顶与拱脚截面的轴力分别比原桥减小 32% 和 35%.这是由于其

截面刚度均比原桥小得多的缘故.

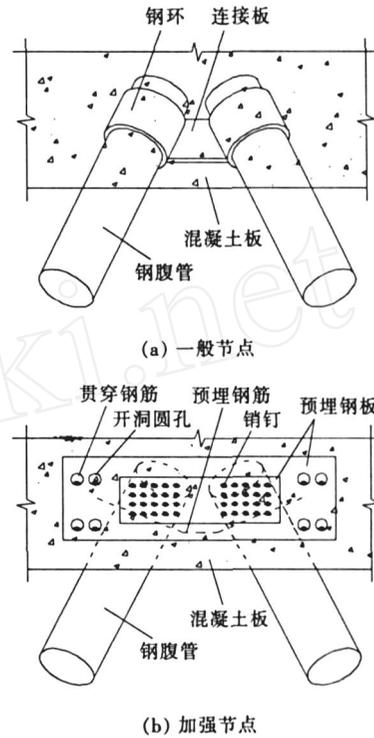


图 4 钢腹杆与混凝土板的节点构造

Fig 4 Node constructure for steel truss web and concrete girder

表 3 恒载作用下拱圈内力计算结果

Table 3 Values of arch internal forces in permanent load

桥梁	拱顶		拱脚	
	$M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	N / kN	$M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	N / kN
原设计桥 (L)	7 294	34 930	3 773	51 570
试设计桥 (S)	3 128	26 454	1 484	39 324
S/L	0.43	0.76	0.39	0.76

表 4 温度效应作用下拱圈内力计算结果

Table 4 Values of arch internal forces in temperature effects

桥梁	拱顶		拱脚	
	$M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	N / kN	$M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	N / kN
原设计桥 (L)	2 326	164	-4 289	108
试设计桥 (S)	1 595	103	-2 777	79
S/L	0.68	0.63	0.65	0.73

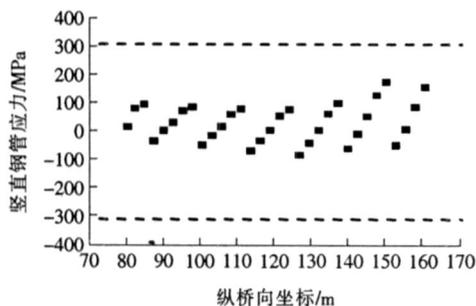
试设计按原设计规范即《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ022 - 85)的有关规定进行荷载效应组合,主拱圈强度验算结果见表 5.可见,不利荷载组合形式下,结构承载力极限值均大于轴力设计值.

表 5 主拱圈强度验算结果

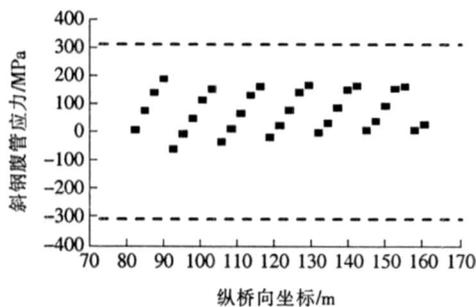
Table 5 Checking computation of arch strength

位置	荷载组合	轴向力 /kN	偏心距 /m	容许偏心距 /m	截面抗力 /kN	安全系数 N_u/N
拱脚	I	-34 839	0.037	0.062 5	41 100	1.18
顶板	II	-23 537	0.030	0.075 0	44 300	1.88
拱脚	I	-33 507	0.049	0.062 5	35 500	1.06
底板	II	-11 989	0.074	0.075 0	25 300	2.11
拱顶	I	-20 350	0.005	0.062 5	51 700	2.54
顶板	II	-18 548	0.003	0.075 0	51 900	2.80
拱顶	I	-17 523	0.008	0.062 5	51 300	2.93
底板	II	-13 254	0.007	0.075 0	51 500	3.88

钢桁腹杆中的直腹板和斜腹杆的强度验算结果如图 5 所示,按照荷载组合 II(1.1 结构重力 + 1.3 汽车 + 超 20 + 1.3 温度)计算获得.图 5 中仅示出右半拱钢桁腹杆的应力值,横坐标为试设计桥直腹杆处纵桥向坐标,纵坐标为应力最大值,虚线代表钢材的屈服强度,表示钢材抗拉、抗压强度为 310 MPa 可以看出,竖直钢腹管和斜向钢腹管的最大轴向应力均未超过钢材抗拉、抗压强度.



(a) 直腹杆



(b) 斜腹杆

图 5 钢桁腹杆应力最大值

Fig 5 Max values of steel truss webs stress

恒载作用下组合拱桥稳定性验算结果见表 6 可见,不管是成桥状态或是裸拱状态,结构的面内、外稳定安全系数均满足大于 4~5 的要求.

表 6 恒载作用下组合拱桥稳定性验算结果

Table 6 Buckling results of composite box arch bridge under permanent load

项目	计算临界力 /kN	结构抗力 /kN	安全系数	
平面内	成桥	276 594	31 398	8.80
	裸拱	240 319	9 928	24.21
平面外	成桥	302 990	31 398	9.65
	裸拱	98 139	9 928	9.89

3.4 试设计拱圈工程数量比较

表 7 给出了主拱圈的主要工程数量.从表 7 中可以看出,钢桁腹杆混凝土组合拱的混凝土数量比原桥减少了 34%;钢材用量为 144.9 t,比原桥增加了 34.4 t 主拱圈自重从原桥的 3 495.5 t,减小到 2 377.4 t,自重减轻近 32%.试设计拱桥节省的混凝土方量与增加的钢筋重量之比为 10:1,若二者的工程造价也粗略地以 10:1 计算的话,那么主拱圈的材料费用则持平.若考虑结构自重减轻所带来的下部工程数量的降低,以及免除腹板钢筋复杂的施工工艺节省的工期和人工费,则钢桁腹杆混凝土组合拱比混凝土拱造价低.另外,32%自重的减轻将有利于提高结构的抗震性能.

表 7 还表示了波形钢腹板混凝土组合拱和平钢腹杆混凝土组合拱的拱圈数量^[3-4].钢桁腹杆混凝土组合拱桥与波形钢腹板混凝土组合拱桥工程数量比较接近;较之平钢腹杆混凝土组合拱桥,其钢材用量减少了 18.9 t,混凝土数量增加了 74.6 m³,拱圈结构重量增加了 167.6 t

表 7 拱圈工程数量

Table 7 Quantities of arch bridge

项目	混凝土 /m ³	钢材 /t	总重 /t
原设计桥 (L)	1 354	110.5	3 495.5
钢桁腹杆混凝土组合拱 (H)	893	144.9	2 377.4
波形钢腹板混凝土组合拱 (E)	911.6	148.6	2 427.6
平钢腹板混凝土组合拱 (F)	818.4	163.8	2 209.8
E/L	0.67	1.34	0.69
F/L	0.60	1.48	0.63
H/L	0.66	1.31	0.68

4 结语

钢桁腹杆混凝土组合截面能有效地减小结构自重,在大跨度 PC 梁桥中应用的优点突出.在分

析混凝土拱桥发展现状的基础上,本研究中介绍了钢腹杆 PC 梁桥中的应用情况,提出了钢腹杆混凝土组合拱桥新桥型构想.以福建宁德岭兜大桥为结构原型的试设计研究表明,新桥型较原混凝土拱桥设计自重减小近 32%,拱圈各截面在恒载作用下轴力明显降低,拱顶与拱脚截面轴力均下降 24%;试设计达到了减小自重、简化施工工序和降低造价的目的.

尽管初步分析表明,钢腹杆混凝土组合拱桥是一种具有应用潜力的新桥型,但要使其在实际工程中得到应用,还必须对其进行基本受力机理、抗震性能、节点构造设计以及施工方法等更加深入的研究.

参考文献 (References):

- [1] 李晓辉,陈宝春.大跨径拱桥的发展[J].世界桥梁,2007(1):9-12.(LI Xiao-hui, CHEN Bao-chun Development of long span arch bridges[J]. World Bridges, 2007(1):9-12.(in Chinese))
- [2] 陈宝春,李生勇,余健,等.大跨度活性粉末混凝土拱桥试设计[J].交通科学与工程,2009,25(1):32-38.(CHEN Bao-chun, LI Sheng-yong, YU Jian, et al Trial design of reactive powder concrete long span arch bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(1):32-38.(in Chinese))
- [3] 陈宝春,王远洋,黄卿维.波形钢腹板混凝土拱桥新桥型构思[J].世界桥梁,2006(4):10-14.(CHEN Bao-chun, WANG Yuan-yang, HUANG Qing-wei Conception of new type of concrete arch bridge with corrugated steel webs[J]. World Bridges, 2006(4):10-14.(in Chinese))
- [4] 黄卿维,陈宝春.160 m 跨径波形钢腹板混凝土拱桥试设计[J].中外公路,2007,27(2):78-83.(HUANG Qing-wei, CHEN Bao-chun Trial-design of 160 m long-span concrete arch-bridge with corrugated steel webs[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(2):78-83.(in Chinese))
- [5] 叶琳.平钢腹板-混凝土组合拱试设计研究[D].福州:福州大学,2008.(YE Lin Trial-design research on concrete arch bridge with plain steel webs[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2008.(in Chinese))
- [6] 欧阳平,李成林,杨红成.钢桁式腹板组合截面在桥梁工程中的应用[J].现代交通技术,2005(5):39-42.(OUYANG Ping, LI Cheng-lin, YANG Hong-cheng Application of steel truss web composite structure in bridge construction[J]. Modern Transportation Technology, 2005(5):39-42.(in Chinese))
- [7] 田其轩.日本钢-混凝土组合桥的发展趋势[J].公路交通技术,2000(3):64-70.(TIAN Qi-xuan Trends of Japan steel-concrete composite bridges[J]. Technology of Highway and Transport, 2000(3):64-70.(in Chinese))
- [8] 严国敏.西欧结合梁桥的现有发展水平[J].国外桥梁,1992(4):1-7.(YAN Guo-min The Modern development of the combined beam bridges[J]. Foreign Bridges, 1992(4):1-7.(in Chinese))
- [9] 陈开利.法国 Boulonnais 高架桥简介[J].国外桥梁,1999(1):15-17.(CHEN Kai-li The introduction of France's Boulonnais Elevated Bridge[J]. Foreign Bridges, 1999(1):15-17.(in Chinese))
- [10] Saul R. Cost efficient design and construction of major steel composite bridges[J]. Revue de Metallurgie, Cahiers D'Informations Techniques, 2001(3):305-317.
- [11] 木村是一,本田明,山村正人,等.那智勝浦道路木ノ川高架の設計-鋼・コンクリート複合トラス[J].梁と基礎,2002(10):31-35.(Kimura Yoshikazu, Honda Akira, Yamamura Makino, et al Design of Kinokawa Viaduct[J]. Bridge and Foundation Engineering, 2002(10):31-35.(in Japanese))
- [12] 藤原浩幸,正司明夫,坂田寛司,等.志津見大の設計・施工-変断面 PC 複合トラス[J].梁と基礎,2005(11):5-11.(Fujihara Hiroyuki, Shoji Aki, Sakata Hiroshi, et al Design and construction of Shitsumi Ohashi Bridge[J]. Bridge and Foundation Engineering, 2005(11):5-11.(in Japanese))
- [13] 青木圭一,高!裕平,能登谷英,等.第二名高速道路猿田川・巴川の設計・施工-世界初の PC 複合トラスラ 4 メン[J].梁と基礎,2005(5):5-11.(Aoki Keiichi, Takatoku Yuhei, Notoya Hideki, et al Dynamic behavior of PC continuous rigid frame composite truss bridge[J]. Bridge and Foundation Engineering, 2005(5):5-11.(in Japanese))
- [14] 李晓莉,胡志坚.葡萄牙欧罗巴大桥的概念和结构设计[J].世界桥梁,2005(4):21-24.(LI Xiao-li, HU Zhi-jian The concept and structure design of Portugal Europa Bridge[J]. World Bridges, 2005(4):21-24.(in Chinese))
- [15] ZHANG Jie, LIU Hai-qing Research on closure scheme of long-span box arch bridge[A]. Jure Radic & Bao-chun Chen Proceedings of Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges[C]. Croatia, Brinjuni Islands: Structural Engineering Conference (SECON) Zagreb, Croatia, 2008: 261-268.