

大跨径拱桥的发展

李晓辉,陈宝春

(福州大学土木工程学院,福建 福州 350002)

摘要: 介绍大跨径混凝土拱桥的发展概况。提出理论极限跨径与理论可行跨径的概念,给出混凝土拱桥和钢拱桥的理论可行跨径。最后以克罗地亚新建的克尔卡桥为原型,提出了钢-混凝土组合桁式拱新型结构,在与混凝土拱和钢桁拱的比较中可以发现,钢-混凝土组合桁式拱在结构性能、经济性能上具有一定的优越性,值得进一步的研究。

关键词: 拱桥;组合结构;理论跨径

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

文章编号: 1671-7757(2007)01-0009-04

1 大跨径拱桥发展概况

拱是桥梁最基本的结构形式之一,已经过2500多年的发展。工程师的创造性劳动、社会的进步、材料与新技术的发明与应用使拱桥技术得以不断发展。已有的桥梁是未来设计的唯一借鉴,因此对已建桥梁进行评价是桥梁设计研究的最主要内容。桥梁技术的每一个进步都应建立在前辈的思想与实践基础之上,根据当代材料、分析手段和施工技术的可能性进行探索与创新。当然土木工程的进步,除了科学知识与经验外,技术人员的创造性也是非常重要的。

拱桥按拱肋的材料可分为圬工拱桥、混凝土拱桥、钢拱桥及钢-混凝土组合拱桥。受自重和经济性制约,圬工拱桥难以向更大跨径前进。随着钢材制造技术的进步,出现了高强轻质合金钢,钢材的进步使钢桥建造技术不断发展和完善。但从经济角度来说,在现代大跨拱桥中,钢筋混凝土拱桥与钢-混凝土组合拱桥是最具竞争能力的两种桥型。近年来,随着高强混凝土材料的出现、施工方法的进步,混凝土拱桥的跨径在不断增大,在某些条件下与梁式桥和斜拉桥等桥型相比愈来愈有竞争力。迄今为止,在世界范围内已修建5座跨径超过300m的混凝土拱桥,其中跨径最大的是420m的中国重庆万州长江大桥,其次的是克罗地亚于1979年建成的主跨径为390m的克尔克一号(Krk 1)桥。

万州长江大桥采用的是预埋钢管混凝土劲性骨架分段分环浇注方法,充分发挥了组合截面优越的受力性能。这种施工方法特别适用于那些劳动力资源丰富的国家。该桥的建成对于混凝土拱桥的长大

化进程有着重要的意义。另外,高强高性能混凝土应用于拱、墩构件以及轻质的上部组合结构中,对于大跨径拱桥减轻自重是非常有意义的。

钢-混凝土组合拱桥中钢管混凝土拱桥应用最为广泛。由于钢管对核心混凝土的套箍作用大大提高了混凝土的塑性性能,同时混凝土内填于钢管之内,增强了钢管的管壁稳定性,使其稳定性也有了极大的提高。因此,钢管混凝土材料应用于以受压为主的构件中,较之钢结构和普通钢筋混凝土结构有其极大的优越性。中国已修建了大量的钢管混凝土拱桥,最大跨径已达到460m(巫山长江大桥)。

2 克罗地亚克尔卡桥简介

克罗地亚于2005年建成了萨格勒布市的克尔卡(Krka)桥(见图1),该桥为钢筋混凝土无铰拱,跨径204m,矢跨比为0.25,桥宽20.4m。

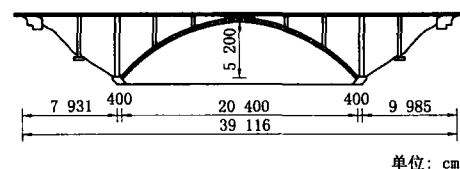


图1 克尔卡桥总体布置示意

该桥的主拱肋采用了单箱双室结构,拱肋高3m、宽10m,顶底板厚40cm,边腹板厚50~60cm,中腹板厚30cm,采用C55混凝土材料。除了在拱顶截面附近的两个拱上立柱采用实体结构外,其余的拱上立柱均采用薄壁的空心箱形结构。由于克尔卡桥址位于高活跃地震带上,因此桥道系采用了钢-混凝土组合结构,即由高1.7m的2片纵向加劲

收稿日期:2006-04-24

作者简介:李晓辉(1978-),男,博士生,2001年毕业于沈阳建筑工程学院交通土建专业,工学学士,2004年毕业于沈阳建筑大学道路与铁道工程专业,工学硕士。

钢梁、纵桥向每隔 4 m 布置 1 片钢横梁以及 25 cm 厚的现浇混凝土桥面板所构成的,以减轻结构自重,并有效地减小了拱肋的截面尺寸。全桥(包括基础和桥台)的总重量仅为 22 910 t,比同等桥宽、跨径为 200 m 的旧马斯利尼察(Maslenica)混凝土拱桥自重降低了近 35%。克尔卡桥拱顶横截面构造见图 2。

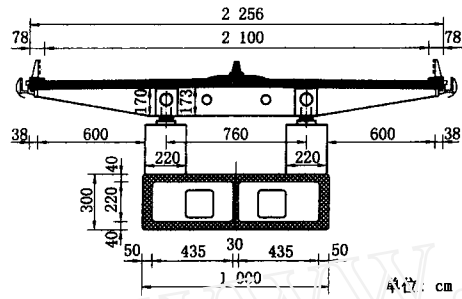


图 2 克尔卡桥拱顶横截面构造

3 拱桥极限跨径分析

本文基于理论假定、经验和已有研究成果,对实际拱桥建立数值模型并进行大量的计算,以对大跨径拱桥设计的关键问题进行探讨。这些计算分析是反复进行的,先假定拱的基本尺寸,通过反复计算和调整尺寸,直至结构的应力和稳定满足要求。

在理论与数值计算分析中,上部结构的选用根据经验并参考了欧洲已建桥梁的统计数值。计算中考虑了恒载、活载、温度变化、混凝土收缩、徐变等因素,截面的验算采用欧洲现行的设计规范。计算中假定所有荷载由拱圈结构承担(没有考虑拱圈与立柱的联合作用),拱轴线采用了悬链线。已有的研究表明,在二次抛物线、圆弧线、悬链线等拱轴中,悬链线是大跨径拱桥拱轴线最好的形式。

本文提出两个概念,其一为拱的理论极限跨径,即能满足裸拱应力和稳定要求所能达到的最大跨径;其二为拱的理论可行跨径,它不仅要求满足拱理论极限跨径的要求,而且要求拱肋的自重不大于拱上

结构(包括所有桥道系和立柱)的自重,同时,经济因素也是确定理论可行跨径所必须考虑的。

对钢筋混凝土拱桥,本文研究中仅涉及了无铰拱。因为从已建的跨径超过 200 m 的混凝土拱桥来看,除了建于奥地利的林根劳(Lingenau)桥因为地处软弱地基而采用两铰拱外,全都采用无铰拱。因此可以认为无铰拱最适合于大跨径混凝土拱桥。大部分已建的跨径在 100 m 以上的混凝土拱桥矢跨比采用 0.15、0.20 或 0.30,比较常用的两个混凝土等级是 C55/67 和 C100/115。

拱圈采用等截面便于施工。拱肋截面的高度和宽度,以及箱形截面的板厚与跨径有关。拱的稳定性要求可用安全系数来表示:

$$\gamma_A = 3 + \lambda/100$$

式中,长细比 $\lambda = L_i/i$, L_i 为拱轴长度, i 为回转半径。

表 1 给出了桥宽 10.5 m(2 车道)与桥宽 20.4 m(4 车道)的混凝土拱桥所对应的理论极限跨径和理论可行跨径。从表中可以看出,理论极限跨径与理论可行跨径存在着较大的差别。另外,无论是桥宽为 10.5 m 还是 20.4 m 的混凝土拱桥,当矢跨比为 0.3 时,理论极限跨径与理论可行跨径均达到了最大。应该指出的是,若桥道系像克尔卡桥采用钢-混凝土组合结构,其理论可行跨径还可以有很大的提高。

对于钢拱桥的分析,选取钢桁两铰拱与钢肋无铰拱作为研究对象,其拱肋由 2 根分离式肋与肋间横撑所构成,并且拱上建筑均为钢结构。另外,矢跨比选用钢拱桥较为常用的 0.125、0.15、0.175 和 0.20,钢材等级选用 S355 和 S460 钢。

表 2 给出了桥宽 20.4 m(4 车道)的钢桁拱与钢肋拱的理论可行跨径。从表中可以看出,随着钢材等级的提高,无论是钢桁拱还是钢肋拱,其理论可行跨径均有一定的提高。另外,钢桁拱在矢跨比为 0.2 时的理论可行跨径达到了最大的 660 m;而钢肋拱

表 1 不同桥宽混凝土拱桥的理论跨径

桥宽/m	矢跨比 $n=f/L$	理论极限跨径/m				理论可行跨径/m			
		混凝土 C55/67		混凝土 C100/115		混凝土 C55/67		混凝土 C100/115	
		等截面	变截面	等截面	变截面	等截面	变截面	等截面	变截面
10.5	0.3	200	550	590	590	200	420	420	420
	0.2	150	500	500	590	150	300	360	360
	0.15	100	300	400	530	100	220	340	340
20.4	0.3	200	500	600	1 200	200	400	400	400
	0.2	100	300	300	1 100	100	300	300	400
	0.15	100	250	200	700	100	220	200	300

则在矢跨比为 0.175 时,理论可行跨径达到了最大值(420 m)。

表 2 桥宽 20.4 m 的钢桁拱与钢肋拱的理论可行跨径

矢跨比 $n=f/L$	钢桁拱理论可行跨径/m		钢肋拱理论可行跨径/m	
	钢材S355	钢材S460	钢材S355	钢材S460
0.125	370	480	230	340
0.150	430	560	270	360
0.175	500	640	300	420
0.200	520	660	230	330

钢桁拱的稳定计算是采用具有初始偏心的几何非线性理论,考虑了拱变形后的形状。在恒载作用下,拱的面内变形的形状与一阶非对称的振型相似,它的最大值根据现行的欧洲钢桥规范进行计算。在本文的分析中其变形值取 $l_i/250$, l_i 为拱的一阶屈曲长度。

研究表明,考虑初始偏心后的几何非线性影响是非常显著的。例如对于跨径为 300 m,矢跨比为 0.15、拱肋高跨比为 1/55、采用 S460 的钢桁拱来说,考虑其初始偏心率的影响,相对于线性分析结果,用钢量要增加 33%;对于 1 000 m 跨径的钢拱桥,用钢量则要增加 89%。

4 钢-混凝土组合桁拱的研究

对于混凝土拱桥,就目前所采用的材料和施工方法来说,万州长江大桥和克尔克桥已经达到了理论可行的最大跨径。克罗地亚克尔卡桥通过桥道系采用钢-混凝土组合结构,使得其结构自重大大减轻,为混凝土拱桥向更大跨径发展提供了有利条件。

为进一步减轻结构自重,本文以克尔卡桥为原型,提出了钢-混凝土组合桁式拱桥的新构思,即拱肋采用了由钢桁架与上下混凝土板构成的钢-混凝土组合结构(见图 3)。为分析其结构性能,在拱上结构、拱肋边界条件以及荷载组合均一致的基础上,本文比较了钢筋混凝土无铰拱(即克尔卡桥)、钢桁式两铰拱和钢-混凝土组合桁式两铰拱 3 种不同的方案。3 种不同方案的拱肋材料用量见表 3。

研究表明,相对于线性分析结果而言,在考虑几何非线性后的钢筋混凝土拱和钢-混凝土组合桁式

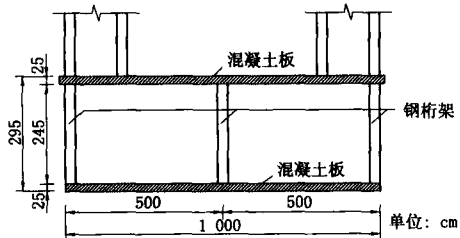


图 3 钢-混凝土组合桁式拱肋构造

表 3 3 种不同方案的拱肋材料用量

	混凝土/m ³	钢筋/t	钢材/t
混凝土拱桥 C45/55;S500	2 885	856	
钢拱桥 S460			2 050
组合式拱桥 S460;C60/75	1 290	220	546

拱的变形将增加 8%,钢桁拱将增加 20%。考虑几何非线性计算的挠度,钢-混凝土组合桁式拱和钢桁拱分别比混凝土拱桥大 41%与 353%。另外,材料初始缺陷对钢-混凝土组合桁式拱的影响要明显小于钢桁拱。

虽然对钢-混凝土组合桁式拱桥的总体造价的评估较难,但相对于混凝土拱桥来说,其经济性能肯定是较为优越的。从克尔卡桥的概预算中可以发现,该桥造价中的 60%左右的费用花在辅助设备,如临时拉索、锚碇、辅助钢塔架和地锚等,若采用钢-混凝土组合桁式拱形式,则在辅助设备和总体造价上将会有大量的节省。

当然,这种新型拱桥的结构性能、施工性能还有待进一步的分析与研究,尤其是混凝土底板和钢-混凝土剪力连接件的细部设计,则需要更多的研究工作。

5 结 语

随着高强高性能混凝土、新型钢材等材料的开发,新型结构的应用以及施工工艺的不断进步,使得大跨径拱桥的修建成为可能。

本文提出了理论极限跨径与理论可行跨径的概念。对于混凝土拱桥,其理论极限跨径与理论可行跨径都在矢跨比为 0.3 时达到了最大,桥宽 20.4 m (4 车道)的理论可行跨径可达 400 m;而对于钢拱桥来说,钢桁架两铰拱桥在矢跨比为 0.2 时的理论可行跨径可达到 660 m,钢肋无铰拱在矢跨比为 0.175 时的理论可行跨径可达 420 m。

研究分析表明,最终控制设计的往往是使用功能上的要求,而不是极限状态。对于混凝土拱桥,就目前所采用的材料和施工方法来说,万州长江大桥和克尔克桥已经达到了理论可行的最大跨径。只有通过减轻桥梁结构自重、采用更高强度的混凝土和更有效的施工方法,混凝土拱桥的跨径才有可能进一步增大。

采用新型结构也是拱桥跨径提高的一个有效途径。本文以新建的克尔卡混凝土拱桥为原型,提出了新型的钢-混凝土组合桁式拱结构。在与混凝土拱、钢桁拱的比较中发现,该组合拱在结构性能上具

有一定的优越性。此外,相对于混凝土拱而言,它还表现出较为优越的经济性能。不过,其结构性能、施工性能还有待进一步的分析与研究,尤其是混凝土底板和钢-混凝土剪力连接件的细部设计。

参 考 文 献:

[1] Jure Radic, Zlatko Savor, Alex Kindij. Development of Arch Bridge[A]. Proceedings of the 4th International Conference on New Dimensions of Bridges[C]. Fuzhou,

China;2005. 249-256.

[2] Zlatko Savor, Jure Radic, Goran Puz. Krka River Bridge Near Skradin [A]. Arch Bridges IV Advances in Assessment, Structural Design and Construction[C]. Barcelona, Spain;2004. 558-565.

[3] Chen Baochun, State-of-the-art of the development of arch bridges in China [A], Proceedings of the 4th International Conference on New Dimensions of Bridge (Key-note paper) [C]. Fuzhou, China;2005. 13-24.

Development of Long Span Arch Bridges

LI Xiao-hui, CHEN Bao-chun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This paper gives a summarized account of development of long span concrete arch bridges, puts forward the conception of both the theoretic ultimate and theoretic feasible span length of arch bridges and specifically, provides the theoretic feasible span length respectively for the concrete and steel arch bridges. Taking the newly-built Krka Bridge in Croatia as the prototype, the paper also proposes a type of new structure of steel and concrete composite truss arch. It is found in the comparison of the structure with only the concrete arch and steel truss arch, the structure of the steel and concrete composite truss arch has certain advantages in aspects of its structural performance, economy and the structure is a one that deserves research in a further way.

Key words: arch bridge; composite structure; theoretic span length

欢迎订阅《世界桥梁》

《世界桥梁》(刊号 ISSN 1671-7767、CN 42-1681/U, 邮发代号 38-55)季刊(每季末月 17 日出版),大 16 开本(80 页),每册定价 8.00 元·全年 32.00 元。

全国各地邮局均可订阅,编辑部也可办理邮购。

《世界桥梁》持有广告经营许可证,代办广告设计,收费合理,时效持久,欢迎洽谈。

编辑部地址:武汉市建设大道 103 号

邮编:430034

电话:(027)83553912(编辑部),83550081(广告部)

传真:(027)83360005

E-mail: sjqlbjb@public.wh.hb.cn

sjql@zmbec.com

《世界桥梁》编辑部

2007 年 3 月