

大跨 UHPC 箱形拱桥试设计研究

王宗山¹, 周建庭¹, 马虎², 丁鹏³, 周璐¹

(1. 重庆交通大学, 重庆市 400074; 2. 重庆市轨道交通(集团)有限公司; 3. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司)

摘要: 该文测定了配制的 UHPC(超高性能混凝土)的基本材料参数,以建成的 210 m 跨径的普通钢筋混凝土箱形拱桥为例,通过原主拱圈箱形截面顶底板、腹板厚度的折减,对 UHPC 箱形截面进行了试设计,并开展有限元分析验证设计的合理性。结果表明:综合考虑截面应力储备、自振特性、刚度、稳定性的情况下,UHPC 箱形拱桥设计时顶底板、腹板厚度可取同类型 C55 箱形拱桥的 1/3。

关键词: 桥梁工程; 箱形拱桥; 超高性能混凝土; 试验设计

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,简称 UHPC)作为一种新型的水泥基材料,以其优异的力学性能和耐久性能,赢得了桥梁建设者的青睐。目前,UHPC 已经成功用于桥梁的新建、维修加固领域中,但是中国同国外相比,拱桥同梁桥相比,呈现出应用数量少、应用跨径不大的特点。而实际上,UHPC 抗压强度高达 100 MPa 以上、是其抗折强度的 10 倍左右,更适合应用于以受压为主的大跨度拱桥建设中。

该文制备超高性能混凝土,测其立方体抗压强度、弹性模量、抗折强度等基本参数,然后以已建成的 210 m 跨径的箱形拱桥为例,从强度、刚度、自振特性、稳定性等方面开展对比分析,为大跨 UHPC 拱桥的设计

提供参考。

1 UHPC 试件力学性能

1.1 UHPC 试件制备及参数测定

试验用 UHPC 钢纤维体积掺量为 1.5%,长度 8 mm,直径 0.12 mm,平直形。UHPC 的配合比为:水泥:粉煤灰:硅灰:石英砂:石英粉:减水剂=1:0.1:0.2:1.1:0.1:0.015(质量比),水胶比为 0.2。制作了立方体试件 3 个(100 mm×100 mm×100 mm 测试抗压)、棱柱体试件 9 个(3 个 100 mm×100 mm×400 mm 测试抗折,6 个 100 mm×100 mm×300 mm 测试弹性模量),测试其 28 d 力学性能,同时在

参考文献:

[1] 杨霞林,林丽霞. 混凝土结构设计原理[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2016.
[2] JGJ 369-2016 预应力混凝土结构设计规范[S].
[3] 张元海,刘世忠. 后张法预应力混凝土梁钢束预应力损失研究[J]. 中国公路学报,2002(2).
[4] 胡狄,陈政清. 考虑反向摩擦的后张法 PC 构件锚固损失的计算[J]. 中国公路学报,2004(1).
[5] 邵旭东,夏红波,程翔云. 后张连续预应力筋锚固损失精确计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008(9).
[6] 张元海,郭臣东,张玉元. 后张法预应力混凝土梁曲线钢

束锚固损失的精确分析[J]. 中国公路学报,2018(1).
[7] 张元海,张睿,王晨光,等. 后张预应力混凝土梁钢束锚固损失研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018(2).
[8] 张元海,张鹏飞,杨霞林,等. 现行铁路桥规中预应力钢筋锚固损失计算方法的改进[J]. 铁道学报,2018(4).
[9] 肖汝诚. 桥梁结构分析及程序系统[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
[10] 吕志涛. 现代预应力结构体系与设计方法[M]. 江苏:江苏科学技术出版社,2010.
[11] P. ROCA, A. R. MARF. Numerical Treatment of Prestressing Tendons in the Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures [J]. Computers & Structures,1993,46(5):905-916.

收稿日期:2019-10-21

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0806007);国家自然科学基金杰出青年科学基金资助项目(编号:51425801);重庆市社会民生类重点研发项目(编号:cstc2018jscx-mxsdX0084);重庆交通大学研究生教育创新基金项目(编号:CYS18214)

作者简介:王宗山,男,博士研究生. E-mail:2425924757@qq.com

拌制过程中测试其坍落扩展度,实测参数值见表 1。

表 1 UHPC 实测力学参数

抗压强度/MPa	棱柱体强度/MPa	抗折强度/MPa	弹性模量/GPa	坍落扩展度/mm
125.3	104.7	24.7	45.2	565.0

从表 1 可以看出:配制的 UHPC 力学性能优异,抗压强度高于 120 MPa,抗折强度高于 14 MPa,弹性模量高于 40 GPa,达到 RPC120 级,坍落扩展度达到 565.0 mm,达到自密实混凝土拌和物的自密实性能等级 SF1,满足泵送浇筑施工要求,适宜用于拱桥施工。

1.2 UHPC 设计参数确定

UHPC 作为新材料,GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》尚未规定其设计取值,该文 UHPC 强度设计值按照如下规则取值: $f_{cd} = 0.88 \times \alpha_{c1} \times \alpha_{c2} \times f_{cu} / \gamma_c$,0.88 为混凝土强度修正系数; α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度的比值,实测值为 $\alpha_{c1} = 104.7/125.3 = 0.84$; α_{c2} 为脆性折减系数,由于相关研究资料很少,参照 C80 分别取 0.88 和 0.87; γ_c 为材料分项系数,参考文献[9]取值 1.3。

故有:强度设计值为 $f_{cd} = 61.9$ MPa,C55 混凝土的设计强度取 25.3 MPa。

2 截面设计及建模情况

2.1 工程概况

某高速公路大桥,净跨径 $L_0 = 210$ m,净矢高 $f_0 = 42$ m,净矢跨比为 1/5,拱轴系数 $m = 1.67$,主拱圈采用悬链线钢筋混凝土箱形截面(C55),拱圈为单

箱单室截面,高度 3.5 m,宽度 7.0 m。主拱圈 1 号节段顶底板厚度由 80 cm 渐变至 40 cm,腹板厚度由 80 cm 渐变至 50 cm;主拱圈 2~13 号节段顶底板厚 40 cm,腹板厚 50 cm;主拱圈 14 号节段顶板厚度由 40 cm 渐变至 50 cm,腹板厚度为 50 cm。拱圈合龙段 HZ 顶板及腹板厚度均为 50 cm。节段划分以及典型截面见图 1。上部结构采用 17 m×13.2 m 的预应力混凝土空心板(C50),单幅桥面净宽 9.5 m,荷载等级为公路—I 级。

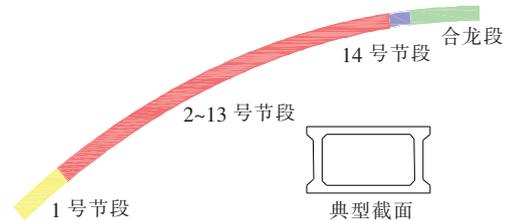


图 1 节段划分图

2.2 UHPC 箱形截面设计

相比于原设计,UHPC 箱形截面显然应该设计得更加轻薄。为探寻 UHPC 箱形截面的合理设计形式,该文保持跨度、上部结构荷载、荷载组合不变,仅以原设计中箱形截面顶底板和腹板厚度为变化量,将其厚度分别折减至原设计的 1/2、 $\approx 1/3$ 、1/4(以编号 C1、C2 和 C3 表示,A、B 分别表示原设计以及仅仅改变材料为 UHPC)。然后以大桥原设计和 UHPC 实测基本力学参数为基础,建立有限元模型分析各设计中箱形截面的应力、稳定性、结构整体刚度以及结构自振特性的变化,从而得出合理的 UHPC 箱形截面。各设计情况的详细取值见表 2。

表 2 各设计情况详细取值

编号	主拱圈材料	宽度/mm	高度/mm	顶底板厚度/mm	腹板厚度/mm	净跨径/m	矢跨比
A	C55	7 000	3 500	400	500	210	1/5
B	UHPC	7 000	3 500	400	500	210	1/5
C1	UHPC	7 000	3 500	200	250	210	1/5
C2	UHPC	7 000	3 500	130	165	210	1/5
C3	UHPC	7 000	3 500	100	125	210	1/5

2.3 模型建立

有限元分析采用 Midas/Civil 2017 进行,全桥均采用梁单元进行建模,共计 512 个节点,542 个单元。主拱圈拱脚采用固结方式,桥面板两端以简支梁方式处理,拱上排架释放两端弯矩,桥面板与排架横向联系

处释放该处弯矩,全桥有限元模型见图 2。

计算相关取值:结构自重包括主拱圈、墩身、桥面铺装、护栏等材料重量,混凝土重度取 26 kN/m³,按照两车道布载。计算体系升温 24 ℃,体系降温 20 ℃,设计基准风速 25.6 m/s。

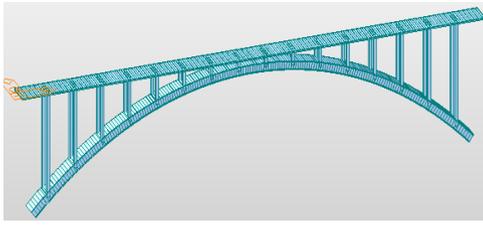


图2 大桥有限元模型

3 结果分析

分别对表2中的5种情况进行建模分析,按照规范采用基本组合进行承载能力极限状态设计,在该例中荷载组合包含恒载(自重和二期)、移动荷载、温度荷载、风荷载以及收缩,大桥处于高速公路上,结构重要性系数取1.1。

表3 不同设计方案下关键截面上下缘应力值

编号	拱脚截面/MPa		L/8截面/MPa		L/4截面/MPa		3L/8截面/MPa		拱顶截面/MPa		同设计强度比值/%
	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	
A	-11.4	-19.0	-13.3	-17.6	-15.1	-15.3	-18.5	-14.3	-17.7	-11.0	75
B	-10.7	-15.9	-14.1	-15.6	-14.8	-15.3	-16.0	-13.2	-14.4	-9.0	26
C1	-12.1	-26.2	-22.1	-19.6	-22.7	-21.4	-23.1	-19.5	-21.3	-17.0	43
C2	-17.8	-36.3	-30.9	-34.6	-33.4	-31.8	-38.6	-28.3	-31.5	-22.3	59
C3	-24.8	-45.2	-36.8	-40.3	-39.2	-38.7	-41.2	-34.7	-38.6	-28.3	73

注:表中应力值为负,代表受压。

3.2 自振特性分析

桥梁结构的自振特性(自振频率、振型等)取决于结构本身的材料特性、刚度、质量及它们的分布情况,当这些影响结构自振特性的因素发生变化时,结构的自振特性参数也会随之变化,自振特性参数的确定是进行结构动力响应计算、抗震、抗风、稳定性分析的前提,也可作为结构损伤识别和质量评定的依据。该例中涉及到材料更换、截面减小,非常有必要进行自振特性分析。

桥梁结构的模态控制方程为:

$$Kx = \omega^2 Mx \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵;它们均为 $n \times n$ 阶矩阵。

求解得到的特征值及其对应的特征向量($\omega_i, x_i, i=1,2,3,\dots,n$),即为结构体系各阶自振频率和振型。表4为各计算模型前5阶自振频率。

从表4中A和B的对比可以发现:主拱圈刚度的改变(UHPC和C55重度差距小,弹性模量约为1.3

3.1 强度分析

分别计算各种设计情况在基本组合下,拱脚截面、L/8截面、L/4截面、3L/8截面、拱顶截面箱梁上下缘承受的最大压应力值,计算结果见表3。

从表3中A和B对比可以看出:截面形式不发生改变,主拱圈材料由C55变化为UHPC时,各个截面的受力更加均匀,表明各截面的弯矩较小,对拱结构受力有利;从B、C1、C2、C3对比可以看出:材料由C55替换为UHPC后,随着顶底板、腹板厚度逐渐减小,各个截面的压应力逐渐增大,拱脚截面下缘的压应力最大,始终是结构的控制应力,控制应力同设计强度的比值也越来越大,当箱梁的顶底板、腹板厚度减小为原截面的1/4时,比值仍然小于原设计,说明即使厚度折减为原来的1/4,UHPC仍有较大的承载潜力。

表4 结构体系前5阶自振频率

编号	自振频率					Hz
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	
A	0.038 8	0.115 2	0.195 5	0.271 6	0.349 4	
B	0.038 8	0.115 5	0.195 9	0.272 0	0.349 7	
C1	0.038 7	0.115 0	0.195 1	0.271 3	0.349 1	
C2	0.038 6	0.114 3	0.194 0	0.270 0	0.348 0	
C3	0.038 5	0.113 8	0.193 3	0.269 2	0.347 2	

倍)对于结构的自振频率影响小;从B、C1、C2和C3对比可以发现,主拱圈箱形截面顶底板和腹板厚度改变对于结构的自振频率影响也很小。这说明UHPC应用于大跨拱桥时,对于结构的自振特性的改变可以忽略不计。

3.3 刚度分析

JTG D61-2005《公路圬工桥涵设计规范》指出,拱桥应按照JTG D60-2004《公路桥涵设计通用规范》规定的短期效应组合,一个桥跨范围内的正负变形

绝对值之和的最大值不应大于计算跨径的 1/1 000, 该例中限值为 21 cm。结合新规范, 仍旧采用基本组合。图 3 为各种取值情况在基本组合下主拱圈的挠度值。

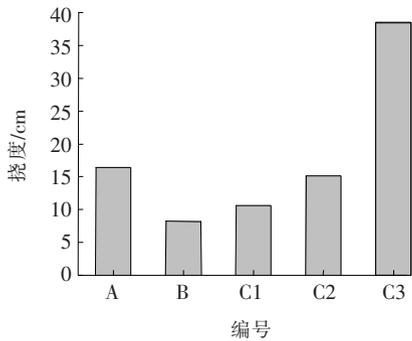


图 3 基本组合下主拱圈挠度

图 3 表明: 截面不变化时, C55 替换为 UHPC 后结构的挠度值减小约 50%; 箱形截面顶底板厚度、腹板厚度逐渐减小时, 主拱圈的挠度值呈现非线性增大, UHPC 的截面厚度为 C55 截面厚度的 1/3 时, 挠度变形值仍小于 C55 结构, 当截面厚度减小为 C55 截面厚度的 1/4 时, 挠度变形值远大于原结构, 超出了规范的限值。

3.4 拱的整体“强度—稳定”验算

参阅 JTG D61—2005《公路圬工桥涵设计规范》中的计算方法, 由于拱圈宽度小于 1/20 计算跨径, 故应该考虑纵向和横向稳定, 考虑偏心距和长细比的双重影响, 按直杆承载力计算公式验算拱的承载力, 表 5 为不同截面拱圈纵向、横向稳定性的验算结果。

表 5 不同设计方案下拱圈稳定性验算结果

编号	方向	设计值/kN	抗力值/kN	抗力值/设计值
A	纵向	97.96	133.16	1.36
	横向	97.96	114.10	1.17
B	纵向	98.91	372.08	3.76
	横向	98.91	293.55	2.97
C1	纵向	75.99	215.08	2.83
	横向	75.99	176.16	2.32
C2	纵向	71.36	131.39	1.84
	横向	71.36	107.95	1.51
C3	纵向	68.49	98.79	1.44
	横向	68.49	81.62	1.19

由表 5 可知: ① 从 A 与 B 的对比来看, 主拱圈材料更换为 UHPC 后, 拱桥的纵、横向稳定性能提升幅

度分别达到 176% 和 154%; ② 从 B、C1、C2、C3 的对比来看, 随着箱梁壁厚的减小, 拱的稳定性能逐渐变差, 但是同 C55 箱形拱桥相比较, 厚度折减至原截面的 1/4 时, 稳定性能仍然略优于前者。

4 结论

(1) 配制了 RPC120 级的超高性能混凝土, 坍落扩展度达到 565 mm, 满足泵送施工要求。

(2) 该文的箱形拱桥, 主拱圈材料由 C55 更换为 UHPC 后, 箱形截面上下缘应力更加均匀, 自振特性几乎没有改变, 挠度值减小为原来的 50% 左右, 纵向稳定性提升幅度达 176% 和 154%。

(3) 随着箱形截面厚度的减小, 截面上下缘的应力逐渐增大, 主拱圈的稳定性能逐渐变差, 当厚度减小为原截面厚度的 1/4 时, UHPC 箱形截面的富余量与原设计相当, 稳定性略优于后者; 主拱圈的挠度值随截面厚度的减小而逐渐增大, 截面厚度减小为原厚度的 1/3 时, 挠度变形值仍小于 C55 结构; 结构的自振特性对于截面厚度的变化不敏感。

(4) 综合强度、刚度、稳定性、自振特性考虑, UHPC 箱形拱桥截面设计时, 厚度宜为 C55 普通混凝土拱桥截面的 1/3。

参考文献:

- [1] 刘超, 马汝杰, 王俊颜, 等. 超高性能混凝土薄层加固法在槽形梁桥中的应用[J]. 桥梁建设, 2017(5).
- [2] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014(3).
- [3] 黄卿维, 沈秀将, 陈宝春, 等. 韩国超高性能混凝土桥梁研究与应用[J]. 中外公路, 2016(2).
- [4] 陈宝春, 黄卿维, 王远洋, 等. 中国第一座超高性能混凝土(UHPC)拱桥的设计与施工[J]. 中外公路, 2016(1).
- [5] GBT 31387—2015 活性粉末混凝土[S].
- [6] 黄卿维, 傅元方, 许春春, 等. 超大跨径活性粉末混凝土拱桥试设计研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2015(3).
- [7] JGJ/T 283—2012 自密实混凝土应用技术规程[S].
- [8] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [9] 吕雪源, 王英, 符程俊, 等. 活性粉末混凝土基本力学性能指标取值[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014(10).
- [10] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [11] JTG D61—2005 公路圬工桥涵设计规范[S].
- [12] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].