

多箱室波形钢腹板 PC 部分斜拉桥 结构动力性能分析^{*}

苗战涛

(河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要:以朝阳沟水库特大桥为研究对象,采用三维有限元软件建立全桥空间力学模型,分别计算多箱室波形钢腹板箱梁、传统砼腹板箱梁的自振频率和振型,通过对比两种截面形式的动力特性研究多箱室波形钢腹板箱梁的受力性能,结果表明,将砼腹板换成波形钢腹板后,箱梁刚度和受弯性能得到改善,同时通过合理设置横隔梁,其抗扭性能得到提高;分别构建多箱室波形钢腹板箱梁部分斜拉桥、连续刚构桥和传统斜拉桥空间力学模型,对比分析不同结构形式多箱室波形钢腹板箱梁的自振频率和振型,分析 3 种桥型的动力特性和刚度,结果显示,波形钢腹板部分斜拉桥的动力性能、主梁刚度优越。

关键词:桥梁;多箱室波形钢腹板箱梁;部分斜拉桥;动力性能

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)06-0096-03

波形钢腹板组合箱梁采用波形钢腹板取代砼腹板,结构新颖,且具有较高的预应力使用效率和经济效益。部分斜拉桥主梁采用波形钢腹板组合箱梁结构,可有效减轻箱梁自重,提高桥梁的跨越能力,降低工程造价。目前关于大跨径波形钢腹板板 PC 斜拉桥动力特性的研究大都针对飘浮体系和半飘浮体系,对采用波形钢腹板的塔梁固结体系斜拉桥的动力特性鲜有研究。该文以朝阳沟水库特大桥为例,采用有限元方法,通过改变结构体系,对比分析不同腹板形式、不同结构形式斜拉桥的动力特性。

1 工程概况

郑州至登封快速通道上的朝阳沟水库特大桥的主跨为 188 m,是目前世界上已建成的最大跨度波形钢腹板部分斜拉桥。跨径组成为 58 m+118 m+188 m+108 m=472 m,全长 484.8 m。主桥上部采用波形钢腹板 PC 部分斜拉桥,结构体系采用连续一刚构体系;桥梁全宽 35.0 m,主梁截面采用波形钢腹板单箱四室截面。斜拉索为双索面,全桥共 52 对斜拉索,塔根部无索区长度为 40 m。斜拉索采用单丝涂覆环氧涂层钢绞线,梁上索距 4.8 m,塔上索距 1.0 m。全桥共设置砼横隔板 16 道,其中主跨 188 m 范围内设置 6 道,索梁锚固处设置钢桁架式横梁,全桥共 52 道。主墩采用双薄壁实心桥墩,与

主梁及主塔固结,墩顶设盆式支座墩。桥梁总体布置见图 1,箱梁截面见图 2。

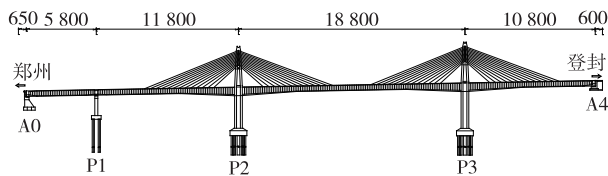


图 1 朝阳沟水库特大桥的总体布置(单位:cm)

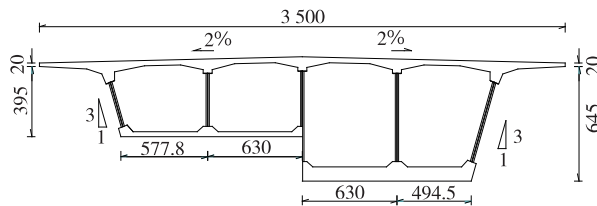


图 2 朝阳沟水库特大桥的箱梁截面(单位:cm)

2 结构有限元模型

采用三维实体有限元软件建立全桥模型。砼采用八结点实体单元 Solid45 模拟,波形钢腹板采用 Shell181 壳单元,与顶、底板砼共用边界模拟与砼的自由度的耦合作用,斜拉索及预应力钢束(包括体内束及体外束)采用 Link8 杆单元,主梁钢横梁采用 Beam44 梁单元,全桥共 1 167 684 个单元。有限元模型见图 3~4。

^{*} 基金项目:河南省科技攻关项目(152102310252);河南省交通运输科技项目(2013k30)

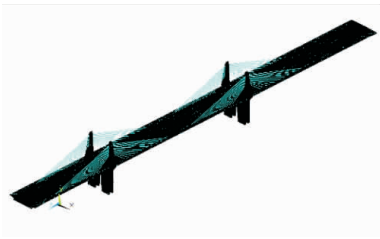


图 3 全桥有限元模型

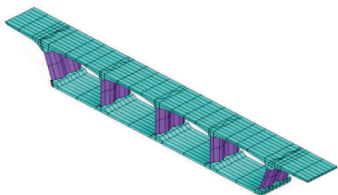


图 4 主梁局部模型

为研究波形钢腹板组合箱梁部分斜拉桥的动力性能,建立砼腹板箱梁空间力学模型,对比分析波形钢腹板部分斜拉桥与砼腹板部分斜拉桥的动力特性。同时为探索波形钢腹板组合箱梁部分斜拉桥的优越性能,建立与依托工程等跨径的波形钢腹板箱梁连续刚构桥和传统斜拉桥空间力学模型,其中传统斜拉桥塔高为 47 m,斜拉索及梁上索距、塔上索距与依托工程相同,连续刚构桥截面及参数与矮塔斜拉桥相同。

3 动力特性对比分析

3.1 动力特性分析方法

部分斜拉桥为复杂结构,动力计算振动方程为:

$$K - \omega^2 M \delta = 0 \tag{1}$$

式中: K 为刚度矩阵; ω 为振型特征值; M 为质量矩阵; δ 为振动向量。

式(1)为振型的齐次方程,要方程有非零解,需将行列式展开,得到频率参数的代数方程,即动力特性归结于特征值问题。

3.2 不同截面形式动力特性分析

一般结构前 20 阶自振频率和振型起控制作用,故选取多箱室波形钢腹箱梁、砼腹板箱梁部分斜拉桥前 20 阶自振频率和振型进行分析。两种截面形式部分斜拉桥的前 20 阶频率和振型见表 1、图 5。

由表 1 和图 5 可知:1) 波形钢腹板主梁与砼腹板主梁结构在给定体系下的频率基本吻合,各阶次振型特点基本相同。2) 与砼腹板箱梁相比,波形钢腹板箱梁各阶自振频率均有所提高,表明结构设置

表 1 两种截面形式部分斜拉桥的自振频率和振型

阶次	频率/Hz		振型特征	频率比
	波形钢腹板	砼腹板		
1	0.456	0.414	主梁纵飘	1.103
2	0.683	0.591	主梁一阶正对称竖弯	1.155
3	1.160	0.978	主梁一阶反对称竖弯	1.186
4	1.342	1.126	主梁二阶正对称竖弯	1.192
5	1.707	1.499	主梁侧弯、主塔同侧侧弯	1.139
6	1.760	1.551	主梁二阶反对称竖弯	1.135
7	2.179	2.034	主梁扭转、P3 塔侧弯	1.071
8	2.289	2.139	主梁扭转、P2、P3 塔侧弯	1.070
9	2.464	2.317	P3 塔同侧侧弯	1.063
10	2.602	2.404	P3 塔相向侧弯	1.082
11	2.606	2.408	P2 塔相对侧弯	1.082
12	2.695	2.554	主梁竖弯、P3 塔侧弯	1.055
13	2.936	2.825	主梁竖弯	1.039
14	3.147	2.832	主梁扭转、主塔侧弯	1.111
15	3.169	3.008	主梁扭转、主塔侧弯	1.054
16	3.239	3.152	主梁竖弯、扭转、P3 塔侧弯	1.028
17	3.506	3.308	主梁扭转、主塔侧弯	1.060
18	3.510	3.483	主梁竖弯	1.008
19	3.599	3.554	主梁扭转、主塔侧弯	1.013
20	3.651	3.697	主梁竖弯	0.987

注:频率比=波形钢腹板箱梁部分斜拉桥的频率/砼腹板箱梁部分斜拉桥的频率

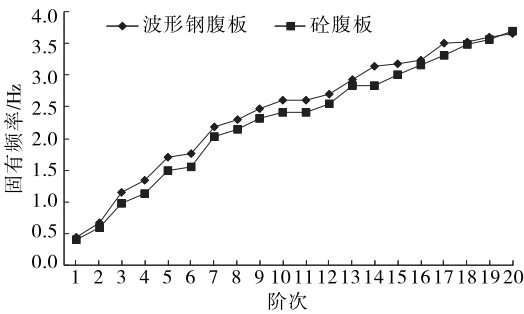


图 5 两种截面形式部分斜拉桥的自振频率对比

成波形钢腹板截面能提高结构刚度。3) 波形钢腹板箱梁和砼腹板箱梁均在第 7 阶出现扭转振型,自振频率分别为 2.179、2.034 Hz,相差 7.12%,说明波形钢腹板箱梁的抗扭刚度比砼腹板箱梁大,主要原因是部分斜拉桥索梁锚固处设置横梁增加了箱梁的抗扭刚度。4) 波形钢腹板箱梁结构前 20 阶自振频率大于砼箱梁,将砼腹板改成波形钢腹板,自重减小的正面效果大于因腹板刚度降低的负面效果,整体刚度得到改善,部分斜拉箱梁腹板换成波形钢腹板其受弯性能得到提高。

3.3 不同结构形式动力特性分析

建立波形钢腹板部分斜拉桥、波形钢腹板连续刚构桥和波形钢腹板传统斜拉桥 3 种有限元模型,选取 3 种桥型的前 20 阶自振频率和振型分析波形钢腹板箱梁在不同结构体系的动力特性。3 种桥型前 20 阶自振频率及振型见表 2、图 6。

根据式(1),结构自振频率越大,刚度越大。由表 2 可知:1) 1 阶自振频率,连续刚构桥最大,部分斜拉桥次之,传统斜拉桥最小,说明 3 种桥型中连续刚构桥的整体轴向刚度最大,矮塔斜拉桥次之,传统斜拉桥最小。2 阶自振频率,传统斜拉桥和部分斜

拉桥基本相当,连续刚构桥略小,说明 3 种桥型中传统斜拉桥和部分斜拉桥的主梁弯曲刚度大,连续刚构桥略小。2) 传统斜拉桥第 4 阶出现主塔面外横弯,部分斜拉桥则在第 5 阶出现,说明传统斜拉桥主塔刚度较小,部分斜拉桥主塔刚度较大。部分斜拉桥第 5 阶出现主梁、主塔面外侧弯,说明部分斜拉桥主梁面外刚度小于其他桥型。部分斜拉桥和连续刚构桥第 7 阶出现主梁扭转振型,且部分斜拉桥自振频率大于连续刚构桥,说明部分斜拉桥箱梁抗扭刚度大于连续刚构桥。

由表 2 和图 6 可知:部分斜拉桥和连续刚构桥

表 2 不同结构形式桥梁的自振频率和振型

阶次	自振频率/Hz			振型特点		
	部分斜拉桥	连续刚构桥	传统斜拉桥	部分斜拉桥	连续刚构桥	传统斜拉桥
1	0.456	0.473	0.446	主梁纵飘	主梁纵飘	主梁纵飘
2	0.683	0.637	0.691	主梁一阶正对称竖弯	主梁一阶正对称竖弯	主梁一阶正对称竖弯
3	1.160	1.141	1.152	主梁一阶反对称竖弯	主梁一阶反对称竖弯	主梁一阶反对称竖弯
4	1.342	1.254	1.244	主梁二阶正对称竖弯	主梁二阶正对称竖弯	主塔面外侧弯
5	1.707	1.648	1.266	主梁、主塔面外侧弯	主梁二阶反对称竖弯	主塔面外侧弯
6	1.760	1.749	1.297	主梁二阶反对称竖弯	主梁面外侧弯	主塔面外侧弯
7	2.179	2.139	1.301	主梁扭转、P3 塔面外侧弯	主梁扭转	P2、P3 塔面外侧弯
8	2.289	2.651	1.389	主梁扭转、主塔面外侧弯	主梁竖弯	主梁竖弯、P2 塔面外侧弯
9	2.464	2.840	1.778	主塔面外侧弯	主梁面外侧弯、扭转	主梁面外侧弯、扭转、主塔面外侧弯
10	2.602	2.881	1.813	P3 塔面外侧弯	主梁竖弯	主梁竖弯
11	2.606	3.069	2.179	P2 塔面外侧弯	主梁扭转、面外侧弯	主梁扭转
12	2.695	3.338	2.669	主梁竖弯、P3 塔面外侧弯	主梁扭转	主梁竖弯
13	2.936	3.404	2.784	主梁竖弯	主梁扭转	主梁面外侧弯、扭转、主塔面外侧弯
14	3.147	3.464	2.949	主梁扭转、主塔面外侧弯	主梁竖弯	主梁竖弯
15	3.169	3.552	3.040	主梁扭转、主塔侧弯	主梁扭转	主梁扭转、P2 塔面外侧弯
16	3.239	3.603	3.083	主梁扭转、P3 塔面外侧弯	主梁竖弯	主梁扭转、主塔面外侧弯
17	3.506	3.814	3.197	主梁扭转、主塔面外侧弯	主梁扭转	主梁扭转、P2 塔面外侧弯
18	3.510	4.308	3.349	主梁竖弯	主梁扭转、面外侧弯	主梁扭转、主塔面外侧弯
19	3.599	4.327	3.475	主梁扭转、主塔面外侧弯	主梁竖弯	主梁竖弯
20	3.651	5.240	3.671	主梁竖弯	主梁扭转	主梁竖弯

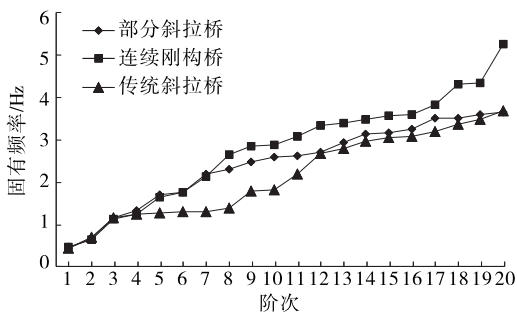


图 6 3 种桥型波形钢腹板箱梁自振频率对比

在第 1~7 阶的自振频率相差较小,其他阶次相差较大;与传统斜拉桥相比,部分斜拉桥前 3 阶结构自振频率相差较小,其他阶次相差稍大。总体来说,3 种波形钢腹板箱梁中,连续刚构桥的整体动力性能最优,部分斜拉桥次之。

4 结论

- (1) 多箱室波形钢腹板箱梁部分斜拉桥相对于
(下转第 102 页)

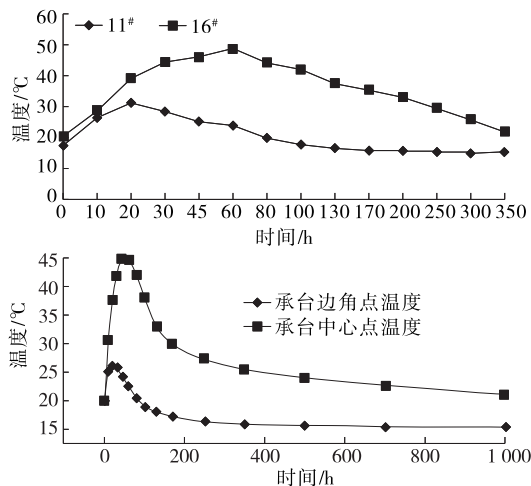


图7 砼内温度实测值、温度场与理论值时程曲线

60 h, 为 24.9°C , 濒临限值, 持续时间达 35 h。其主要原因是气温骤降、保温措施不及时。在砼覆盖后初期温度上升缓慢, 14 h 后水化热反应速率及升温速率加快, 至 45 h 后砼水化热反应逐渐减慢, 且受冷却管的影响温度上升逐渐减慢。水化热降温阶段至 100 h 后砼降温速率为 $0.10\sim 0.2^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 至 168 h 冷却管停止通水, 此后砼降温速率低于 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 砼后期降温速率平缓。在表面温度与大气温度最大温差低于允许值 20°C 时拆除模板, 模板拆除后承台砼表面平整、棱角平直, 未出现蜂窝麻面和肉眼可见的温度应力裂缝。

4 结语

对某悬索桥承台大体积砼进行一次性浇筑, 从砼原材料选择和砼配合比设计、优化施工技术、冷却水管优化布置等方面分析该工艺的可行性, 利用有

限元计算结果和实测数据进行分析, 得如下结论: 1) 温度计算值与实测值吻合较好, 理论计算分析结果可靠, 可以 MIDAS/Civil 水化热分析结果为依据控制大体积砼的裂缝开展。2) 承台砼一次性浇筑工艺可行, 优化后的方案合理。

由于理论分析边界条件和实际施工边界条件存在差异, 实测数据与理论值存在差别, 而目前的有限元分析软件无法模拟动态变化的边界条件, 需进一步研究和优化。

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] 朱伯芳. 考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J]. 水利学报, 1991(3).
- [3] 美国内务部垦务局. 混凝土坝的冷却[M]. 侯建功, 译. 北京: 水利电力出版社, 1958.
- [4] 田洋. 大体积混凝土水化热温度场有限元分析[J]. 交通世界, 2018(19).
- [5] 吴永红, 黄元文. 悬索桥重力式锚碇大体积混凝土温度分析与控制[J]. 中国水运, 2011(1).
- [6] 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.
- [7] 张桂芳, 梁天贵, 曾有艺, 等. 大体积砼水化热分析及温控措施[J]. 公路与汽运, 2018(5).
- [8] 毛家宽, 杨晓东. 大体积混凝土水化热的控制方法及效果[J]. 黑龙江交通科技, 2015(6).
- [9] 陈应波, 李秀才, 张雄. 大体积混凝土浇筑温度场的仿真分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2004, 21(2).

收稿日期: 2019-05-30

(上接第 98 页)

砼腹板箱梁具有一定积极效果, 波形钢腹板箱梁自重减小的正面效果大于腹板刚度降低的负面效果, 波形钢腹板截面的受弯性能提高, 整体刚度大于砼腹板。

(2) 连续刚构桥、部分斜拉桥、传统斜拉桥的动力特性依次降低, 部分斜拉桥的动力特性介于连续刚构和传统斜拉桥之间; 波形钢腹板部分斜拉桥及传统斜拉桥主梁弯曲刚度比连续刚构桥大, 部分斜拉桥主梁面外刚度比其他桥型大, 多箱室波形钢腹板部分斜拉桥和连续刚构桥的抗扭刚度大于传统斜拉桥。

参考文献:

- [1] 姚玲玲, 郭理学. 大跨度波形钢腹板矮塔斜拉桥[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2016(9).
- [2] 陈水生, 钟汉清, 桂水荣, 等. 波形钢腹板多塔斜拉桥动力特性分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(2).
- [3] 李广夏. 波形钢腹板 PC 组合箱梁连续刚构桥动力特性及抗震性能分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [4] 吴兴邦, 吕云. 三塔斜拉桥动力特性影响参数分析[J]. 公路工程, 2015, 40(6).

收稿日期: 2018-09-29