

文章编号:1671-6833(2010)06-0001-05

基于模态分析的鄆城黄河公路大桥优化设计

王东炜¹, 张奇伟², 王用中³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省交通勘察设计院有限责任公司, 河南 郑州 450052; 3. 河南海威工程咨询有限公司, 河南 郑州 450001)

摘 要: 波形钢腹板箱形梁桥是一种较为新颖的桥梁结构形式. 从结构的动力特性研究入手, 通过改变不同结构断面形式、设置不同数量内横隔板, 对结构动力特性的差异进行了比较分析, 为鄆城黄河公路大桥的优化设计工作提供了技术支持, 也为其它工程的设计提供了借鉴.

关键词: 波形钢腹板; 连续箱梁; 优化设计; 模态分析; 横隔板; 截面设计

中图分类号: U442 **文献标识码:** A

0 引言

法国学者于上世纪 80 年代提出用轻质高强钢板代替厚重的混凝土腹板、并配以体外预应力索的设想, 随后修建了首座采用加劲钢腹板的预应力混凝土组合箱梁桥——Ferte - Saint - Aubin 桥. 后来法国学者 Pierre Thirvans 将平钢板改为波形钢板, 由此形成了结构受力更合理的波形钢腹板 PC 组合箱梁. 目前, 世界上已建成多座波形钢腹板 PC 组合梁桥, 跨度已达到 400 m, 特别是在法国和日本, 已制订了相关的设计规范和施工指南^[1], 并被广泛应用^[2-3]. 我国波形钢腹板箱梁桥的实践工作也已开始^[4-5], 但相应的设计规范还未形成, 尚有许多概念与构造设计上的问题需要研究解决^[6]. 桥梁结构的动力特性作为动力分析的基础, 对正确进行桥梁的抗震设计、健康检测和维护具有十分重要的意义^[7]. 同时, 动力参数是结构的固有属性, 能直观地反映结构整体与局部质量和刚度的分布特性, 但目前基于结构固有特性, 进行波形钢腹板桥优化设计方面尚少有报道^[8-9]. 笔者以鄆城黄河公路大桥主桥结构为对象, 从结构固有特性比较分析的角度, 对该桥梁截面的概念设计和横隔板的局部构造

优化设计进行了探索性研究, 并将该研究成果应用到了该桥的实际优化设计之中.

1 工程概况

山东鄆城黄河公路大桥主桥采用 70 m + 11 × 120 m + 70 m 波形钢腹板预应力混凝土连续箱梁结构, 总长为 1 460 m, 总体布置见图 1. 桥梁采用双向 4 车道高速公路标准, 宽度 28 m, 上下行双幅分离布置. 单幅上部箱梁为单箱单室断面(见图 2), 箱梁顶宽 13.5 m, 箱梁底宽 6.5 m, 翼缘悬臂长 3.0 m, 悬臂端部板厚 0.20 m, 悬臂根部厚 0.50 m. 墩顶根部梁高 7.0 m, 跨中梁高 3.0 m. 为改善 1/4 跨径处的应力状态, 梁高按 1.6 次抛物线变化. 箱梁顶板厚 0.25 m; 底板厚度 0.25 ~ 0.80 m, 按二次抛物线变化. 波形钢腹板采用抗拉强度为 310 MPa, 抗剪强度为 180 MPa 的 Q345qc 钢材, 波长 1.6 m, 波高 0.22 m, 水平面板宽 0.43 m, 水平折叠角度为 30.7°, 内径 R 为 1.20 m, 钢板厚度 8 ~ 14 mm. 箱梁和桥墩连接处设置盆式橡胶支座. 下部结构采用箱形桥墩(见图 3). 初步设计文件为了提高整个结构的横向抗变形能力, 每 120 m 跨主梁除支点设有端隔板外, 还在纵向不同位置加设了 6 道壁厚 0.50 m 的横隔板.

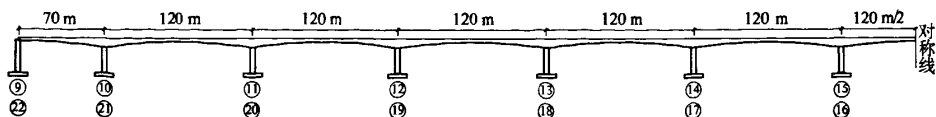


图1 鄆城黄河桥桥跨布置图

Fig. 1 Layout of the Juan Cheng Yellow River bridge

收稿日期:2010-04-10; 修订日期:2010-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978232)

作者简介:王东炜(1961-),男,郑州大学教授,博士,主要从事工程结构可靠性设计与鉴定研究, E-mail: dongwei-wang@zzu.edu.cn.

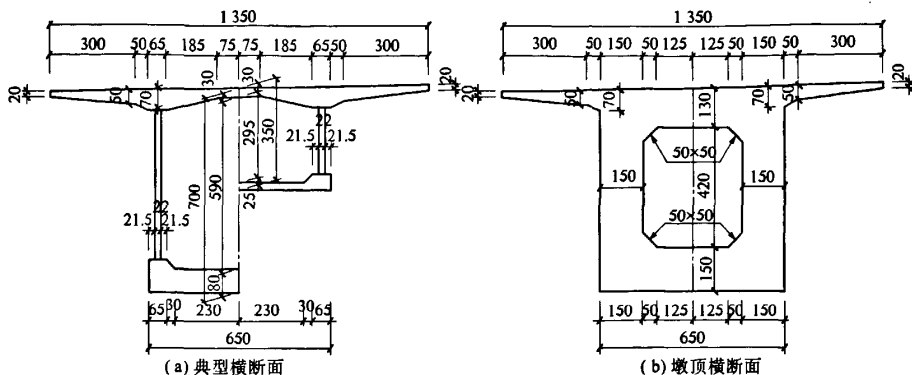


图2 箱梁横断面

Fig. 2 Cross section of the box girder

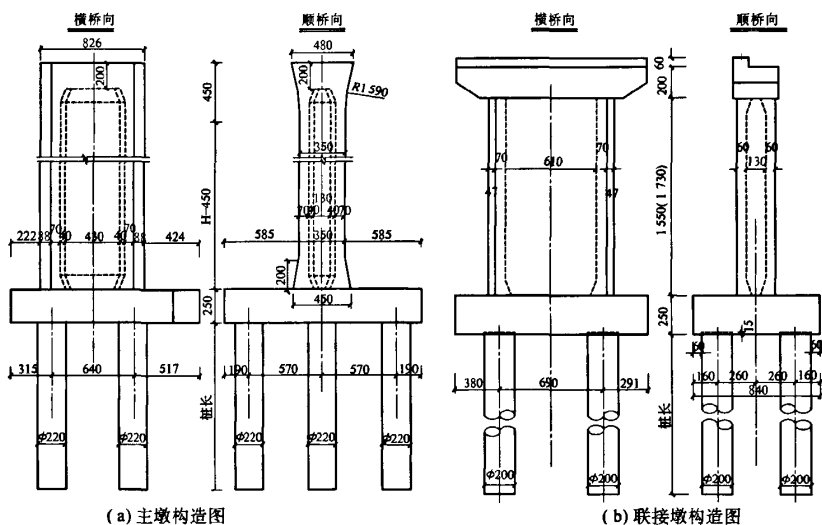


图3 桥墩构造图

Fig. 3 Pier constructions

2 有限元分析

2.1 空间有限元建模

主桥上部结构的混凝土顶板与底板、波形钢腹板、混凝土横隔板,下部结构的混凝土箱形薄壁墩均采用板壳单元^[10]模拟。整桥有限元模型结构节点数目 217 502,单元数目 336 484。有限元模型见图 4。模态分析中忽略预应力的影响。

主梁采用 C50 混凝土,弹性模量 $E_c = 3.45 \times$

10^4 MPa,泊松比 $\nu_c = 0.2$,密度 $\rho_c = 2\ 600\text{ kg/m}^3$;桥墩混凝土强度等级为 C30,取弹性模量 $E_c = 3.0 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\nu_c = 0.2$,密度 $\rho_c = 2\ 600\text{ kg/m}^3$;取钢腹板弹性模量 $E_s = 2.07 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\nu_s = 0.2$,密度 $\rho_s = 7\ 800\text{ kg/m}^3$ 。

主桥桥墩编号为 9#~22#,共计 14 个墩。根据该桥的实际情况,每墩设置 2 个支座,边界条件如图 5 设置,其中 16#墩顶设置为顺桥向限位支座。



图4 主桥有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the main bridge

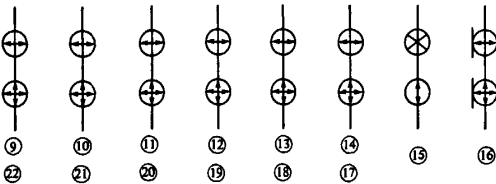


图 5 支座布置示意图
Fig.5 Layout of the supports

2.2 计算工况的确定

2.2.1 梁截面优化设计

为研究波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁结构的力学特点,对腹板分别设置 3 种不同材料与形式,对每种工况分别进行模态分析进行比较.3 种工况分别采用混凝土腹板(厚度 0.25 m)、平钢腹板(厚度 10 mm)和波形钢腹板(厚度 8 ~ 14 mm 变化).与初步设计资料相对应,各工况下每跨内均设置 6 片横隔板.

对结构的动力特性分析,一般情况下,结构的低阶自振频率和振型起控制作用.采用子空间迭代法进行分析,给出前 12 阶频率和振型结果.3 种工况对应的模态分析结果见表 1.由表 1 可以看出,3 种形式箱梁的前 6 阶振型是一致的.

表 1 不同截面形式箱梁的模态分析结果

Tab.1 Results of the model analysis of the box girder with different cross section

振型序号	混凝土腹板箱梁		波形钢腹板箱梁		平钢腹板箱梁	
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述
1	0.587 02	竖弯	0.575 12	竖弯	0.582 32	竖弯
2	0.614 93	竖弯	0.597 42	竖弯	0.605 99	竖弯
3	0.749 50	竖弯	0.730 35	竖弯	0.740 50	竖弯
4	0.754 97	竖弯	0.745 84	竖弯	0.756 40	竖弯
5	0.861 29	竖弯	0.837 39	竖弯	0.849 44	竖弯
6	0.990 35	竖弯	0.945 05	竖弯	0.960 23	竖弯
7	1.124 20	竖弯 + 横弯	1.069 90	竖弯	1.087 70	竖弯
8	1.129 00	竖弯	1.091 50	竖弯	1.113 30	竖弯 + 横弯
9	1.268 90	竖弯 + 横弯	1.195 10	竖弯	1.215 20	竖弯 + 横弯
10	1.311 60	横弯 + 竖弯	1.310 50	横弯	1.328 90	横弯 + 竖弯
11	1.357 30	横弯	1.327 80	竖弯	1.350 40	竖弯
12	1.423 70	竖弯	1.356 30	横弯	1.376 10	横弯

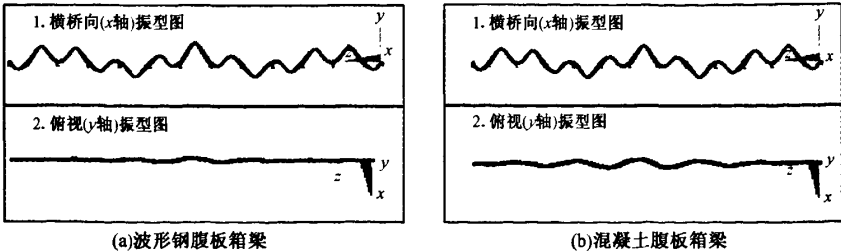


图 6 波形钢腹板与混凝土腹板箱梁的第 9 阶振型图

Fig.6 The 9th models of the box girder with corrugated steel or concrete webs

图 6 分别给出了波形钢腹板箱梁、混凝土箱梁的第 9 阶振型图.平钢腹板箱梁与混凝土箱梁的振型图十分相似,不再给出.由图 6 可以看出,波形钢腹板箱梁基本上是单纯的“竖弯振型”,而混凝土箱梁和平钢腹板箱梁则是“竖弯 + 横弯”组合振型.波形钢腹板箱梁的振型较之混凝土箱梁和平钢腹板箱梁的振型更为简明和简单.

2.2.2 横隔板优化设计

基于初步设计资料,对波形钢腹板箱梁的横隔板数目进行优化设计研究.初步设计阶段每跨内设置 6 片横隔板.为进行横隔板数量的优化设计,分别设置 6 片和 3 片,以及不设内横隔板,分 3 种工况对结构进行模态分析,对应的模态分析结果见表 2.图 7 分别显示了 6 片横隔板箱梁和无横隔板箱梁的第 9 阶振型图,可以看出二者是非常相似的.为进一步比较横隔板对波形钢腹板结构与平钢腹板结构的不同影响,计算了不设内横隔板时,平钢腹板结构的动力特性,与波形钢腹板箱梁的比较分析见表 2 和图 8.图 8 分别显示了无横隔板的波形钢腹板箱梁与平钢腹板箱梁的第 9 阶振型图,表明平钢腹板箱梁的抗扭性较差,波形钢腹板箱梁的抗扭性则相对较好.

2.3 计算结果比较分析

2.3.1 梁截面优化设计分析

每跨设6片内横隔板时,比较表1中3种工况下结构的动力特性,可知:

(1) 3种工况连续梁桥的各阶频率值非常接近,说明整体绝对刚度相差不大;结构以平面受力为主,横向扭转刚度改变对纵向刚度影响不大.

(2) 3种工况至少前12阶振型均只出现主梁的竖弯和横弯两类振动,不包含扭转振型.振型顺序均是主梁竖弯在前横弯靠后,低阶振型均表

现为横梁竖弯振动,薄壁固定墩顺桥向侧倾,体系呈现纵飘,与设计意图吻合.

(3) 混凝土腹板箱形梁桥与平钢腹板箱形梁桥的高阶振型中均包含主梁竖向弯曲与横向弯曲明显耦合的振型,而波形钢腹板箱形梁桥的主梁竖向弯曲与横向弯曲相对独立.说明钢腹板的波折形状对于箱梁结构的受力更清晰明确,也更有利于验算分析.

2.3.2 横隔板的优化设计分析

对波形钢腹板箱形梁桥结构,跨内横隔板的数目变化时,比较表2中4种工况下连续梁桥的动力特性,可以看出:

表2 具有不同数量横隔板的箱梁模态分析结果
Tab.2 Results of the model analysis of the box girder with different number diaphragms

振型序号	波形钢腹板 (6块横隔板)		波形钢腹板 (3块横隔板)		波形钢腹板 (0块横隔板)		平钢腹板 (0块横隔板)	
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述
1	0.575 12	竖弯	0.580 70	竖弯	0.587 57	竖弯	0.594 50	竖弯
2	0.597 42	竖弯	0.603 01	竖弯	0.609 90	竖弯	0.618 55	竖弯
3	0.730 35	竖弯	0.736 94	竖弯	0.745 46	竖弯	0.755 64	竖弯
4	0.745 84	竖弯	0.752 10	竖弯	0.757 35	竖弯	0.768 10	竖弯
5	0.837 39	竖弯	0.844 54	竖弯	0.852 23	竖弯	0.864 82	竖弯
6	0.945 05	竖弯	0.952 97	竖弯	0.964 05	竖弯	0.979 39	竖弯
7	1.069 90	竖弯	1.078 50	竖弯	1.090 80	竖弯	1.109 40	竖弯
8	1.091 50	竖弯	1.100 40	竖弯	1.106 80	竖弯	1.127 40	竖弯+扭转
9	1.195 10	竖弯	1.204 50	竖弯	1.218 60	竖弯	1.225 40	扭转+横弯+竖弯
10	1.310 50	横弯	1.325 20	横弯	1.340 20	横弯	1.252 90	扭转+横弯+竖弯
11	1.327 80	竖弯	1.337 70	竖弯	1.353 60	竖弯	1.273 60	扭转
12	1.356 30	横弯	1.371 50	横弯	1.387 10	横弯	1.350 30	扭转

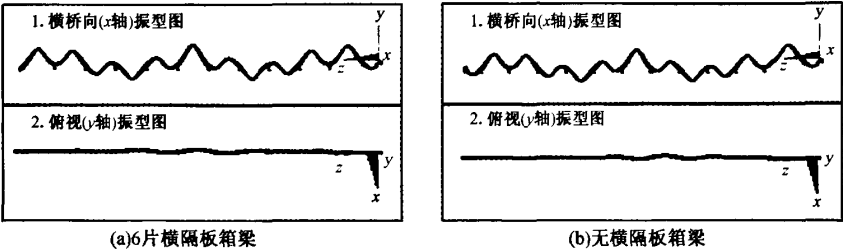


图7 波形钢腹板箱梁第9阶振型图

Fig.7 The 9th models of the box girder with different number diaphragms

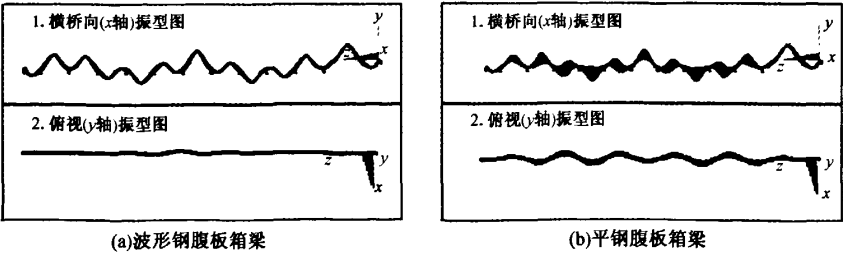


图8 波形钢腹板与平钢腹板箱梁的第9阶振型图

Fig.8 The 9th models of the box girder with corrugated or plane steel webs

(1) 波形钢腹板连续箱梁桥各阶频率值随着内横隔板数目的减少变化不大,并且3种工况下波形钢腹板连续箱梁桥的前12阶振型均包含竖弯和横弯两类振动,不包含扭转模态。说明波形钢腹板连续箱梁结构的箱形截面特征突出,自身具有较大的抗扭刚度,即使不设置内隔板,扭转问题也不明显。

(2) 平钢腹板连续箱梁桥跨内不设横隔板时,高阶振型出现“扭转+竖弯+横弯”的耦合模态以及扭转的独立模态,说明平钢腹板连续箱梁结构的箱形截面特征已不明显,与前两种腹板类型结构相比性能较差,需要设置横隔板等措施进行加强。

3 结论

(1) 采用结构动力特性分析的方法可以对桥梁的概念设计和构造设计提供有效支持。

(2) 采用波形钢腹板时,整桥结构的力学性能与混凝土腹板箱梁相比没有大的差别,而比平钢腹板箱梁的抗扭和抵抗横向变形的性能好;同时因为波形钢腹板箱梁的高阶振型保持独立,结构表现出更为有利的特点。

(3) 即使不设内横隔板,主桥结构的抗扭转与抵抗横向变形的能力仍然很强,建议在每跨内仅设置专供体外预应力束弯起的转向块,而省去原定的6片内横隔板。该建议已为郾城黄河公路大桥的设计方案所采纳。

(4) 方法简单有效,可为其他工程提供一定

的借鉴作用。

参考文献:

- [1] European Prestandard 1993-1-5. Eurocode 3 - Design of steel structures[S]. Brussels, Europe; February 2004.
- [2] JOHNSON R P, CAFELLA J. Bridges of corrugated webs in plate girders [J]. Proceedings of Institute of Civil Engineering Structures and Bridges, 1997, 123: 158-166.
- [3] 大島 邦裕, 白谷 宏司, 趙唯堅. 超高強度纖維補強コンクリート“ダクル”を用いた複合構造に関する研究開発[R]. 大成建設技術センター報 第38号, 2005.
- [4] 万水, 李淑琴, 马磊. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁结构在中国桥梁工程中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 16-20.
- [5] 陈宜言, 王用中. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [6] 刘玉攀. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 125-164.
- [7] 刘保东, 陈海波, 任红伟. 波纹钢腹板混凝土箱梁动力特性改善研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 29-33.
- [8] 张奇伟. 基于动力特性分析的桥梁结构设计方法研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2007.
- [9] 何波, 郭小川, 朱宏平, 等. 大跨薄壁墩连续刚构桥动力特性研究[J]. 世界桥梁, 2006(4): 40-43.
- [10] 张立明. Algor, Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

Optimization Design of the Yellow River Main Bridge in Juancheng Based on the Researches on the Dynamic Characteristics

WANG Dong-wei¹, ZHANG Qi-wei², WANG Yong-zhong³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Province. Communications Planning Survey & Design Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450052, China; 3. Henan Haiwei Engineering Consultation Co. Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The box girder with corrugated steel webs is a kind of new type of the bridge structure. On basis of figuring out the dynamic characteristics of the structure, this paper provides some creative work to seek the characteristics of this kind of structure by comparing the different dynamic characteristics with changeable sections and different numbers of inner diaphragms, which is helpful to the optimization design of the Yellow River main bridge in Juancheng.

Key words: corrugated steel web; continuous box girder; optimization design; model analysis; diaphragm; section design.