

文章编号:1671-6833(2005)04-0020-05

弯钢箱梁桥的动力分析及模态试验

周勇军, 赵小星, 贺拴海, 宋一凡

(长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 针对大曲率弯钢箱梁桥的动力特性,通过大型有限元程序分别建立单梁模型、梁格模型及板单元模型,进行了数值仿真分析,同时利用力锤冲击法对室内模型进行了模态试验,并将试验结果与数值分析结果进行对比分析.结果表明,单梁法不适于计算横向模态,普通的梁格法可以较好地模拟弯箱桥竖向和扭转的动力性能,但不应考虑主梁静力计算时横向刚度的换算关系,同时论文提出了一种竖向梁格单元划分法,可以较好地计算弯箱梁结构横向的动力性质,证明梁格法模型可以用于计算该类桥梁的动力特性分析.

**关键词:** 桥梁工程; 连续弯箱梁; 梁格法; 模态试验

**中图分类号:** U 448.21 **文献标识码:** A

0 引言

我国西南西北大部分地区属山岭重丘和黄土沟壑区,山高谷深、冲沟纵横、地形非常复杂险峻,在这些地区修建高等级公路,常常设置弯桥来满足路线线形的需要.国内学者在弯桥研究上做了一些工作,归纳起来大致有:①弯桥构造的研究;②弯桥分析方法的研究;③弯桥支撑布置和平面变形的研究;④弯桥预应力配束和分析方法的研究;⑤弯桥在弯扭剪复合受力下的截面强度和配筋计算研究.由此可见,对于曲线桥的静力特性,国内外已进行了广泛深入的研究,形成了较为有效的计算方法.对于弯桥的动力特性的相关研究则不多,文献[1]用单梁单元讨论了弯桥的地震响应问题;文献[2]对大跨径桥梁动力性质做了比较详细的阐述;还有些学者试图通过板单元来解决桥梁的动力学问题,但没有涉及到纵横隔梁比较多的大曲率钢箱梁动力特性,作者通过对室内一大曲率弯钢箱梁桥进行数值分析和模态试验,研究不同的单元模式及建模的方式对这类弯桥的动力影响,得出了一些的结论.

1 模型概况

本模型桥为两跨连续弯钢箱梁桥,桥跨布置

为 8.1 m+6.5 m,单箱四室结构,梁高 18 cm,下底板宽 50 cm,上顶板宽 80 cm,每个箱室内上下各设两条纵肋,沿桥纵向每隔 145 mm 布置一道横隔板,旨在加强结构的稳定性和整体工作性能.模型采用薄钢板加工焊接制成,其总体布置、平面几何线型、横断面分别如图 1~3 所示.

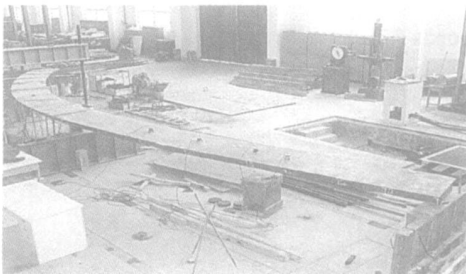


图 1 模型总体图  
Fig. 1 Layout of the model

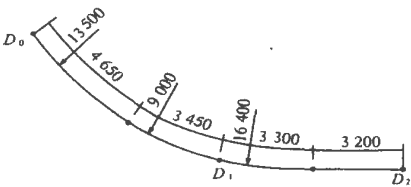


图 2 模型平面线型 单位:mm  
Fig. 2 Plane geometry of the model

收稿日期:2005-06-27;修订日期:2005-10-10  
基金项目:国家西部交通建设科技项目(2002.318.223.29)  
作者简介:周勇军(1978-),男,湖北孝昌人,长安大学讲师,在读博士研究生,主要从事桥梁结构动力及抗震分析方面的研究;

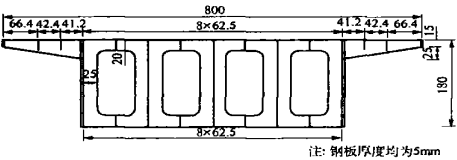


图 3 模型横断面 (单位:mm)  
Fig. 3 Model's cross section

2 有限元分析模型

目前,曲线桥梁的动力计算大多采用空间有限元分析模式,计算模式的选取着重于结构的刚度、质量、边界条件的模拟,它们应尽量和实际结构相符.结构的刚度模拟主要是指杆件的轴向刚度、弯曲刚度、剪切刚度、扭转刚度等.结构质量的模拟主要指杆件的平动质量和转动惯量的模拟.对它们处理是否得当直接关系到动力计算的精确度.

2.1 单梁模式

**模型 1 裸梁模式:**这种模式是最普通的模式,也是在计算直桥静力和动力性能使用最多的一种模式,它将全梁的质量(平动质量和转动质量)和刚度(竖向、横向挠曲刚度、扭转刚度)都集中在中间节点上,但在结果振型中“滤掉”了整体的扭转成分.

**模型 2 脊梁模式(鱼刺型):**脊梁计算模式如图 4 所示,在这种模式中,全梁质量和竖向刚度及扭转刚度仍旧集中在中间梁上,横向刚度由无质量的横梁提供,从而把刚度系统和质量系统分开处理,这种模型能从计算成果中得到桥梁的扭转成分.



图 4 脊梁模型  
Fig. 4 Back model

2.2 梁格模式

在静力学中,梁格法的基本思想是用一个等效梁格来模拟主梁结构,将分散在箱梁每一区段内的弯曲刚度和抗扭刚度集中于最临近的等效梁格内,实际结构的纵向刚度集中于纵向梁格构件内,而横向刚度则集中于横向梁格构件内.从理论上讲,实际结构和对应的等效梁格承受相同荷载时,两者的挠曲应恒等,而且在任一梁格内的弯

矩、剪力和扭矩应等于该梁所代表的实际结构部分的内力.但是由于实际结构和梁格体系有着不同的结构特性,上述“等效”的理想状况是难以达到的,只能近似模拟.

在本文动力分析时,按照静力学建模的思想,将箱梁在纵向沿腹板中对中切开,梁格的每根纵梁的中性轴和整个上部结构的中性轴保持一致,如图 5 所示,根据纵横向不同的单元刚度和质量的分配模式,笔者又对结构进行以下几种模型分析.

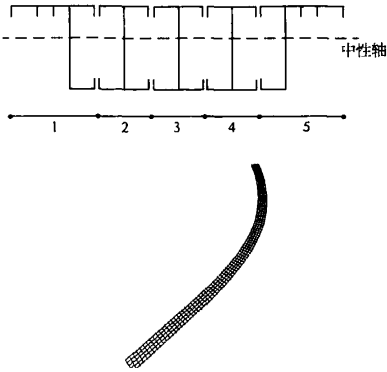


图 5 梁格法模型 I  
Fig. 5 Space beam girder model I

**模型 3** 每片主梁考虑纵肋的影响,即将纵肋的刚度和质量计入到主纵梁中去,同时利用梁桥空间计算理论,将横隔板用“1”梁(工字梁)模拟<sup>[3]</sup>;

**模型 4** 每片主梁不计入纵肋的影响,即主梁和横隔板都为“1”梁;

**模型 5** 每片主梁考虑纵肋的影响,横向梁格计入换算刚度 $I_1$ <sup>[4,3]</sup>,同时横隔板计入“1”梁的刚度和质量;

$$I_1 = \frac{h^2 d_{\text{上}} + d_{\text{下}}}{d_{\text{上}} + d_{\text{下}}} \quad (1)$$

式中: $h$  为箱梁高度; $d_{\text{上}}$ 、 $d_{\text{下}}$  分别为箱梁上顶板与下底板的厚度.

**模型 6** 每片主梁考虑纵肋的影响,横向梁格不考虑换算刚度 $I_1$ ,横隔板不计“1”的翼缘即横隔板截面为矩形,其他同模型 5.

**模型 7** 纵向梁格中主梁和次边梁不计质量和质量惯矩,主梁面积和横向刚度全部集中于中梁上,原主梁竖向弯曲刚度分配于 5 个主梁上,约束扭转刚度将由两个边梁的竖向刚度提供<sup>[3]</sup>.

**模型 8** 相应跨径的直桥,其他同模型 6.

以上几种模型是根据梁格法在竖向的静力学特征得到的,在模拟竖向的力学性质是可以的,但在研究横向动力性质是否可行还缺乏验证,为此,

笔者借鉴梁格法的思想,提出了专门计算弯箱梁桥横向动力性质的模型 9.

**模型 9** 按图 6 所示沿截面中性轴在竖向将梁分为上下两部分,上下梁对水平轴的竖向刚度按移轴定理(式 2)进行处理,横隔板按实际的矩形板考虑,即不计翼缘刚度和质量.

$$I_x=I_o+Ad^2$$

(2)

式中: $I_x$  为绕截面形心轴的惯矩; $I_o$  为截面绕自身形心轴的惯矩; $A$  为截面的面积; $d$  为截面形心到中性轴的距离.

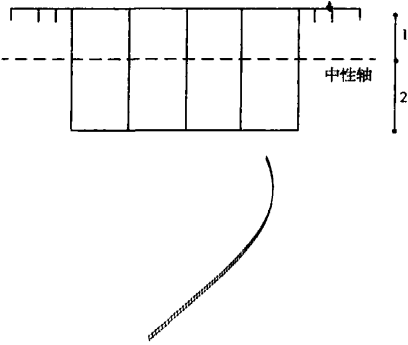


图 6 梁格法模型II

Fig. 6 Space beam grid method II

2.3 板单元模式

**模型 10** 将该模型的顶板、底板、纵肋、腹板以及横隔板都离散为空间板壳单元,保证板壳单元与结构相应部位的重心重合,分网后共有单元 1 857 个,节点 1 188 个.

由于模型断面尺寸较小,制作较为不便,在制作过程中钢箱梁温度过高发生了不同程度的扭转,同时由于弯梁桥的弯扭耦合效应的存在,为了保证试验过程中结构的稳定而不发生翘曲,实际

结构在外弦点沿径向滚轴支撑,有限元模型的边界条件为竖向、横向以及扭转约束,其余约束自由度释放.

3 模态试验

通过冲击力锤对结构进行激振,并完成了相应的模态试验与分析.为了获取钢桥的真实模态,不但在桥梁中轴线每跨的八分点处布置了测点,而且沿两侧翼缘处相应处也布置了测点,全桥共有 51 个测点.实验过程中,采用单点激励多点拾振的方法,试验先采集动态信号,存储为频响函数,而后导入到模态专用分析程序,利用单自由度识别法(SDOF)对结构进行模态分析.试验现场测得的结构模态参数如图 7 所示.

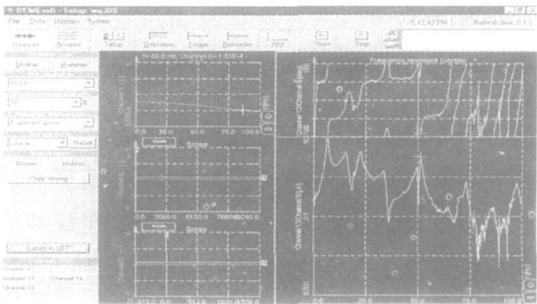


图 7 试验频响函数

Fig. 7 Frequency response function

4 结果分析

各个模型计算的前八阶模态结果见表 1 所示.将模型试验值与计算值列表对比如表 2 和表 3.

面内竖向和面外横向前三阶振型见图 8、图 9 所示.

表 1 各种模型计算结果对比表

Tab. 1 Frequency comparison of different FEM models																				Hz
阶次	模型 1		模型 2		模型 3		模型 4		模型 5		模型 6		模型 7		模型 8		模型 9		模型 10	
	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型	频率	振型
第一阶	9.62	一阶竖弯	2.39	一阶竖弯	7.76	一阶竖弯	3.86	一阶竖弯	9.83	一阶竖弯	5.51	一阶横弯	8.04	一阶竖弯	6.04	一阶横弯	3.13	一阶竖弯	8.61	一阶竖弯
第二阶	17.83	二阶竖弯	4.47	二阶竖弯	14.27	二阶竖弯	10.42	二阶竖弯	13.93	一阶横弯	8.82	一阶竖弯	14.9	二阶竖弯	9.78	一阶竖弯	5.75	二阶竖弯	15.85	二阶竖弯
第三阶	24.81	一阶横弯	6.28	一阶横弯	17.67	一阶横弯	16.53	扭转	18.05	二阶竖弯	9.83	二阶横弯	19.72	一阶横弯	10.19	二阶横弯	6.6	一阶横弯	21.23	一阶横弯
第四阶	38.17	三阶竖弯	9.73	三阶竖弯	30.76	三阶竖弯	16.72	一阶横弯	22.08	二阶横弯	16.1	二阶竖弯	32.36	三阶竖弯	17.12	二阶竖弯	11.66	二阶横弯	32.15	纵飘
第五阶	45.25	二阶横弯	11.86	二阶横弯	30.86	二阶横弯	21.69	扭转+竖弯	39.06	三阶竖弯	20.88	三阶横弯	36.76	二阶横弯	22.17	三阶横弯	12.33	三阶竖弯	34.97	三阶竖弯
第六阶	58.48	高阶竖弯	15.04	高阶竖弯	46.73	高阶竖弯	24.69	扭转	42.74	三阶横弯	31.85	高阶横弯	49.5	高阶竖弯	24.94	高阶竖弯	19.01	高阶竖弯	38.02	二阶横弯
第七阶	84.03	高阶竖弯	21.6	高阶竖弯	62.11	高阶横弯	29.5	二阶横弯	50.76	高阶横弯	32.89	扭转	70.92	高阶竖弯	30.49	高阶横弯	25.84	三阶横弯	44.84	扭转
第八阶	93.46	高阶横弯	25.51	三阶横弯	66.23	高阶竖弯	40	扭转+竖弯	56.18	高阶横弯	34.72	三阶竖弯	78.74	三阶横弯	33.22	高阶横弯	27.17	高阶竖弯	47.17	高阶竖弯

表 2 面内试验值与计算模型频率对比表  
Tab .2 Frequency comparison of test and calculated results in the vertical direction

项目	试验值	模型 1		模型 6		模型 10	
		计算值	误差	计算值	误差	计算值	误差
		/Hz	/%	/Hz	/%	/Hz	/%
一阶	8.63	9.62	11.00	8.82	2.00	8.61	0.00
二阶	17.26	17.83	3.00	16.10	7.00	15.85	8.00
三阶	33.70	38.17	13.00	34.72	3.00	34.97	4.00

表 3 面外试验值与计算模型频率对比表  
Tab .3 Frequency comparison of test and calculated results in the transverse direction

项目	试验值 /Hz	模型 6		模型 9	
		计算值	误差	计算值	误差
		/Hz	/%	/Hz	/%
一阶	6.62	5.51	17	6.6	0
二阶	12.78	9.83	15	11.66	8
三阶	22.49	20.88	7	25.84	15



图 8 竖向前三阶振型示意  
Fig .8 The former three modal shapes in the vertical direction

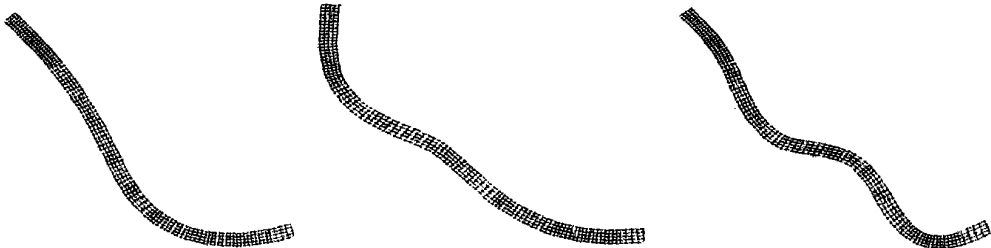


图 9 横向前三阶振型示意  
Fig .9 The former three modal shapes in the transverse direction

由表 1~表 3 可以看出：

(1) 裸梁模式(模型 1)无法考虑横梁的横向刚度,计算竖向低阶频率时尚可,但计算横向频率时精度较差.脊梁模式(模型 2)虽然可以考虑横向连接的影响,但同时它却改变了结构的竖向刚度的分配,计算竖向频率误差较大.

(2) 纵肋可以提高结构的竖向刚度和稳定性,在初步设计时虽然可以忽略它而直接用箱梁进行计算.但从模型 3、4 的对比分析中可以看到,在做动力分析时,不考虑纵肋会对结果产生很大的误差.

(3) 按照梁格法理论在做多隔板弯箱梁的动力分析时,模型 5 在进行横向刚度等效时,人为地改变了结构的横向质量、刚度及其分布<sup>[4,3]</sup>,从而造成了横向频率的改变,虽然应用静力法的等效概念,可以求出结构在横向的等效刚度,但如果对每个截面进行类似等效的工作,是极为繁琐的,也是不现实的.按照梁桥空间计算理论得到的模型 3,也是由于“重复”计入了横向横隔板的质量和刚度而导致了误差.笔者认为应用梁格法进行动力分析时,在竖桥向可以按照梁格法理论进行分析,

在横向梁格不应再考虑主梁刚度的等效,而直接考虑不带翼缘板的隔板的影响(即模型 6).虽然模型 7 在做斜拉桥等大型柔性结构整体分析时应用效果较好,但在做大曲率弯桥结构动力分析时,还是由于刚度的等效不合理导致精度较差.

(4) 由于弯桥的弯扭耦合效应比较明显,在动力性能方面也是如此,尤其是在具有多道横梁的情况下,改变梁格的面积和刚度值将明显改变结构的频率和振型次序.

(5) 板单元在做弯桥动力分析时,竖向频率比较准确,横桥向计算误差大,同时计算工作量大,不易在工程界推广应用.

(6) 对本模型来说,由于布置支撑点时主要考虑到结构的稳定,没有诸多地考虑其他静力性质,得到的相应跨径直桥的竖向和横向频率要较弯桥对应的稍高.

(7) 根据计算值与试验值的对比,笔者提出了梁格法在计算动力性质时的一种划分方法(即模型 9)可以用来计算结构横向动力性质.

同时还应看到,试验值与计算值总的来说还是有一定的偏差的原因在于:

(1) 由于边界条件对结构动力性质影响较大,在有限元分析中对真实结构精确地模拟显得很困难,同时钢箱梁在制作过程中出现了翘曲,结构不再保持平截面假定,也就是说在振动过程中不再是完全的竖向弯曲振动和横向弯曲振动,结构的约束扭转刚度和翘曲刚度无法模拟,导致了计算结果和实际结果有一定偏差.

(2) 由于采集系统的偶然误差和系统偏差的存在,以及锤击的力度和方向性把握不好,也导致了测量数据的不完备性.

5 结论

(1) 梁桥单梁模型在直桥静力计算时有较大优势,但在进行类似的大曲率弯钢箱梁桥动力分析时,只可用来进行竖向频率的计算,由于无法考虑桥梁横向刚度和扭转的影响,在计算横向频率时精度不高.

(2) 利用梁格法计算大曲率弯桥的竖向频率是可行的,但不应采用静力分析时横向刚度的换算关系,而且计算横向频率效果较差,文中提出的模型<sup>9</sup>可以较好地计算弯桥的横向频率,但这种

模型计算竖向频率较差,建议针对不同的计算内容,建立不同的梁格法模型.

(3) 纵肋对弯箱桥的动力性能有较大影响,计算时不可忽略.

(4) 板单元计算弯钢箱梁桥竖向动力性能精度较好,但建模繁琐,工作量大,而且无法专门分析单项因素对结构动力特性的影响,不适于工程推广.

参考文献:

[1] 朱东生,刘世忠,虞庐松.曲线桥地震反应研究[J].中国公路学报,2002,15(3):42~48.  
[2] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997.  
[3] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.  
[4] 刘钢城.梁格法在某单箱双室连续箱梁纵向应力分析中的应用[J].铁道勘测与设计,2002,(5):18~20.  
[5] 韩皓,曹劲松.曲线箱梁桥实用设计方法的研究[J].内蒙古工业大学学报,1997,16(2):23~27.  
[6] 徐建国,陈淮,王博,等.连续箱梁桥力学性能分析[J].郑州大学学报(工学版),2004,25(1):28~30.

Dynamic Analysis and Modal Test of a Cured Steel Box Girder

ZHOU Yong-jun, ZHAO Xiao-xing, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract :** In order to study the dynamic characteristic of a curved steel box girder, this paper uses single-beam element and space beam girder method as well as finite element of space plate to simulate the structure respectively. At the same time, a modal test is carried out indoors with impact excitation method, the results of which are compared with those of the three finite element method. The results show that the single-beam method is not appropriate to the calculation of the transverse modals, space beam girder method is advisable in the vertical and torsion direction when disregarding the static transverse stiffness conversion, moreover, the paper introduces a new partition of space beam girder method to simulate the bridge's transverse models. The space beam girder method presented in the paper can be employed well to simulate the dynamic characteristic of cured box girder, and it can give reference to the seismic analysis of the continuous cured girder.

**Key words :** bridge engineering; continuous cured box girder; space beam girder method; modal test