

钢管—钢管混凝土复合拱桥的车桥共振分析

陈友杰, 吴庆雄, 孙 潮, 陈宝春

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 在福鼎山前大桥动载试验的基础上, 建立了桥梁—车辆相互作用的力学模型, 应用有限元分析的方法计算山前大桥的车辆振动效应, 并讨论了车辆行驶速度和桥面平整度等对该型桥梁冲击系数的影响。

关键词: 钢管; 钢管混凝土; 拱桥; 车桥共振; 冲击系数

中图分类号: U441

文献标识码: A

Study on bridge - vehicle dynamic interaction of hybrid arch bridge of steel tube and concrete filled steel tube

CHEN You - jie , WU Qing - xiong , SUN Chao , CHEN Bao - chun

(College of Civil Engineering and Architecture , Fuzhou University , Fuzhou , Fujian 350002 , China)

Abstract : Field tests are carried out on the Fuding Shanqian bridge. On the basis of the experimental results , a numerical method is developed to calculate the dynamic response of the bridge to a vehicle moving across the bridge decks. At last , the effects of passage velocity of vehicle and roughness of bridge deck on the impact coefficient of this kind of bridge have been discussed.

Key words : steel tube ; concrete filled steel tube ; arch bridge ; bridge - vehicle dynamic interaction ; impact coefficient

文献[1]提出一种新型桥梁结构—钢管与钢管混凝土复合拱桥。该桥型设计中仅在拱肋的拱脚段充填混凝土,其余部分仍为空钢管,使拱肋的自重较小、重心较低。与钢管混凝土拱桥相比,该桥型提高了拱肋的横向稳定性及横向抗震,并避开了拱顶段管内混凝土不密实的问题。用钢管与钢管混凝土复合拱桥概念设计了第一座该桥型的试验桥—福鼎山前大桥。山前大桥为主跨 80 m 的下承式刚架系杆拱,净跨径 75 m,净矢高 15 m,净矢跨比 1/5,拱肋间距 13.30 m。大桥的详细介绍见文献[1]。针对该桥所做的动力特性分析见文献[2]。本文对该桥的车桥共振进行分析,通过对实桥实测值与解析值的对比,研究该桥的面内和面外振动特性及车辆振动特性,另外还讨论了该类型桥梁冲击系数的变化。

车桥共振研究始于 1844 年法国和英国对 Britannia 桥进行的模型实验,其后美、英、苏等各国均对此做了大量研究。近年来,美国 Florida 大学的 Huang D Z 和 Wang T L 采用有限元数值计算等方法对 T 梁桥、板梁桥、箱梁桥、斜腿刚构桥以及斜拉桥等的车辆振动问题均进行了分析研究^[3-5]。国内相关的研究开展得较晚,在钢管混凝土拱桥的车桥振动方面做了一些研究^[6,7]。文献[7]认为大跨度钢管混凝土肋拱桥设计中的冲击系数的取值沿用钢筋混凝土拱桥的设计规范具有合理性。但该文未考虑桥面不平整度的影响,而根据文献[8]桥面不平整度造成桥梁冲击作用巨大。文献[6]采用一各态历经的桥面平整度模拟曲线,对跨径 136 m 的一座钢管混凝土拱桥进行研究后认为大跨度钢管混凝土肋拱桥的车辆冲击系数的数值按设计规范取值为 0,但实际数值不可忽视。

1 桥梁动载试验概况

收稿日期: 2004 - 05 - 20

作者简介: 陈友杰(1971 -), 男, 讲师。

基金项目: 福州大学科技发展基金资助项目(XKJ(YM) - 0113)

为了解钢管—钢管混凝土复合拱桥的振动特性,2000 年对该桥进行了动载试验以测定其自振频率和振型、阻尼系数等动力特性以及在不同车速刹车及跳车情况下的面内与面外的动力特征和动力反映。另外,试验还测量了该桥的桥面平整度曲线。动载试验选取上游侧拱肋拱顶和左(右)横撑以及桥面的跨中、两 $L/4$ 拱肋变截面处和左(右)拱脚截面进行试验。桥梁的实际动力特性的测定采用“天然脉动激励法”,其计算分析采用北京东方振动与噪声技术研究所开发的 DASP 专业分析软件。试验荷载用车使用重为 16.55 t 普通载重汽车,其车速分为 20 km h^{-1} 和 30 km h^{-1} 两种。

2 有限元计算分析

2.1 有限元计算模型

有限元计算分析采用 TDAP 软件¹⁾进行计算。全桥有限元计算模型见图 1。模型由拱肋、横撑、吊杆、纵梁、横梁、桥面板、主墩以及帽梁等组成桥梁的空间立体结构,其中吊杆单元采用不具有抗压缩性的单元,桥面板单元考虑到桥梁的实际构造采用铰接。

有限元计算中取用的大桥拱肋、吊杆、横撑、RC 横梁、RC 桥面板和 RC 主墩的材料特性见表 1。

表 1 山前大桥的材料特性

Tab.1 Material character data of the bridge

项 目	拱肋		吊杆	横撑	RC 横梁	RC 桥面板	RC 桥墩
	混凝土	钢管					
E/GPa	31.9	206	206	206	27.4	27.4	27.4
p/MPa	39.2	235.2	235.2				
泊松比 ν	0.167	0.283	0.283	0.283	0.167	0.167	0.167

桥梁运动微分方程的矩阵形式为:

$$[M_b]\{\ddot{b}\} + [C_b]\{\dot{b}\} + [K_b]\{b\} = \{F_{ly}\} \quad (1)$$

式中: $[M_b]$ 为桥梁总体质量矩阵; $[C_b]$ 为桥梁总阻尼矩阵; $[K_b]$ 为桥梁总刚度矩阵, $\{F_{ly}\}$ 为车辆对桥梁的作用力矢量。

有限元计算分析的车辆模型采用单自由度体系,其质量与试验车辆相同、基频取 2.6 Hz, 阻尼系数取 0.03(见图 2)^[7]。车辆模型行车速度取用实际试验值。车辆运动微分方程的矩阵形式为:

$$[M_v]\{\ddot{v}\} + [C_v]\{\dot{v}\} + [K_v]\{v\} = \{F_{lv}\} \quad (2)$$

式中: $[M_v]$ 为车辆质量矩阵; $[C_v]$ 为车辆阻尼矩阵; $[K_v]$ 为车辆刚度矩阵; $\{F_{lv}\}$ 为桥梁对车辆的作用力矢量。以上两方程通过桥梁与车辆的相互作用力矢量耦合,求解方程组采用 Wilson - 数值积分法。

2.2 大桥固有振动特性分析

大桥实桥试验和计算分析所得的面内反对称第一振型、面内对称第一振型、面外对称第一振型以及面外反对称第一振型的结构自振频率值的比较如表 2 所示。而图 3 为试验和计算分析所得这 4 种振型图比较。由表 2 可见除大桥的面

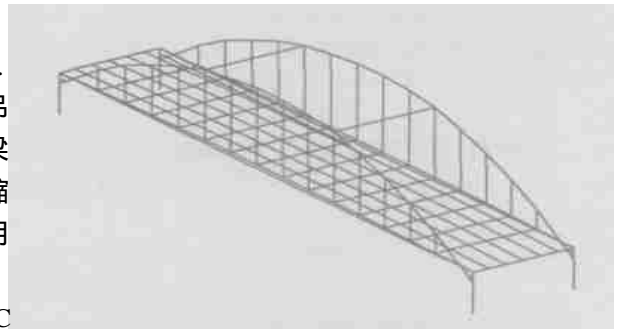


图 1 山前大桥有限元计算模型

Fig.1 FE model of Shanqian bridge

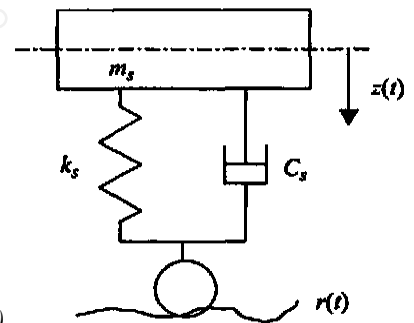


图 2 车辆计算模型

Fig.2 Vehicle model

表 2 山前大桥的固有振动特性

Tab.2 Natural frequencies of the bridge

振 型	$f_{\text{计算}}/\text{Hz}$	$f_{\text{试验}}/\text{Hz}$	误差/ %
面内反对称第一振型	1.156	1.137	- 2
面内对称第一振型	2.049	2.341	14
面外对称第一振型	1.781	2.050	13
面外反对称第一振型	2.671	2.751	3

1) (株)アーケ情報 システム: TDAP 机能说明书, 1999.

内对称第一振型和面外对称第一振型的自振频率的计算值与试验值相差分别为 14 % 和 13 % 外, 其它 2 种振型的自振频率的计算值与试验值基本相同. 由图 3 可见大桥各振型振幅比值图的计算与试验图也基本一致, 其中尤以面内和面外反对称第一振型吻合较好.

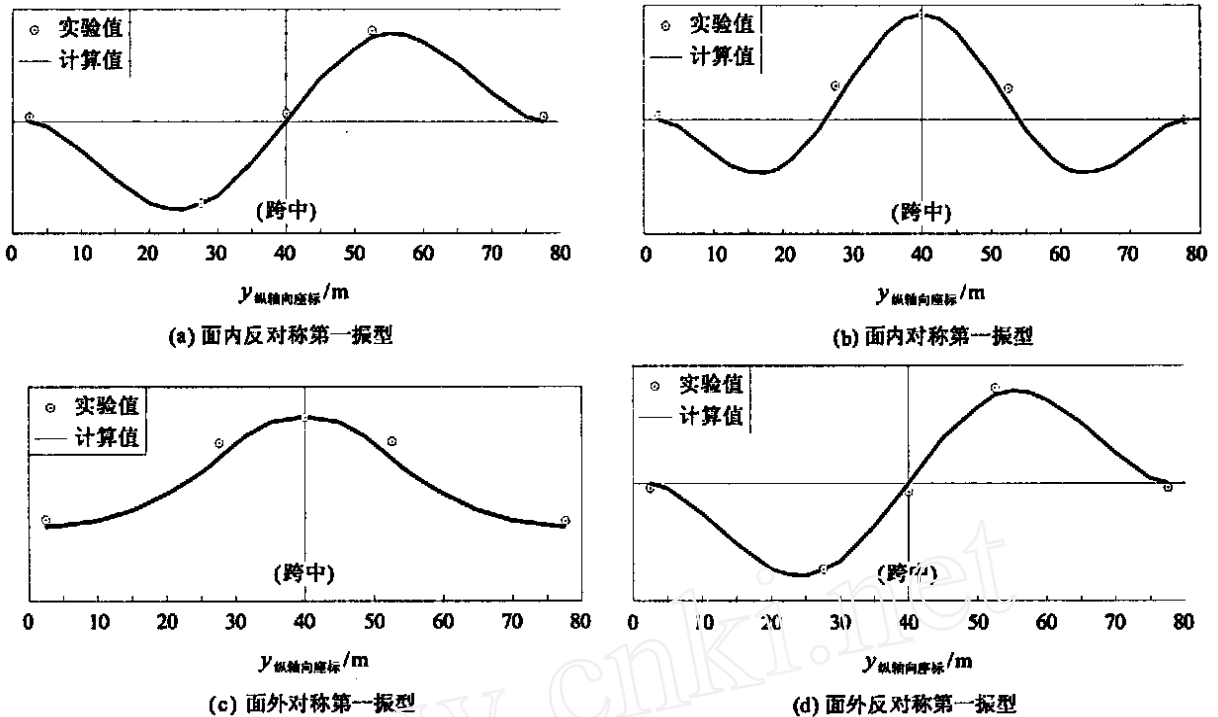


图 3 大桥固有振型图

Fig. 3 Typical vibration modes of the bridge

2.3 桥面平整度以及桥梁行车反映分析

实测大桥桥面平整度如图 4(a) 所示. 采用 MEM¹⁾ 法对实测所得桥面平整度数据进行处理得到桥面平整度参数, 并运用非线性最小二乘法对桥面平整度的性能进行评价.

图 4(b) 中将实测并进行处理得到的桥面平整度参数用虚线表示, 实线为运用非线性最小二乘法评价桥面平整度所得近似计算模式曲线. 计算模式曲线表达式为: $s_r = A/\Omega^2$, 其中波数 Ω 采用 0.05 ~ 5.00 次 $\cdot m^{-1}$ 范围内, 而依据非线性最小二乘法推导得到路面平整度系数 $A = 0.00586 cm^2 \cdot (m \cdot 次^{-1})^{-1}$. 根据国际标准化协会制定的 ISOSCI/WG4 标准, 此桥面的路面平整度等级为 B 级, 路面状况良好.

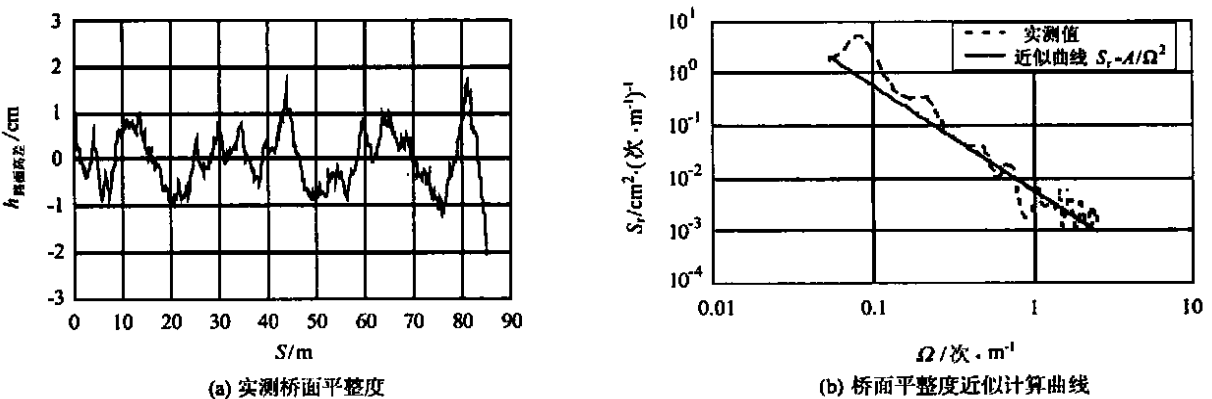


图 4 山前大桥桥面平整度分析图

Fig. 4 Calculated model of the bridge deck's roughness

1) 日野干雄. スパクトル解析, 朝仓书店, 1977.

采用离散的有限微分法对桥面行车性能进行分析,其分析模型采用桥梁—车辆—桥面系三者相互作用模型系统,并利用计算所得桥面平整度近似模式曲线 $s_r = A / (\lambda^2 + \lambda^2)$ 从而得到各工况下的计算值。为便于比较,将实测值与计算值列于表 3。

表 3 中数值为纵梁跨中的最大动挠度值(已剔除静挠度成分)。由表中的计算值与试验实测值对比可见两者吻合相当一致。两者的一致说明所建立的桥梁理论计算模型与实际相一致,且有限元计算具有相当的精确度,也说明大桥承受车辆行车的性能与桥梁设计值相一致,即桥梁静、动力性能都满足设计要求。

表 3 大桥的跨中动挠度值

Tab. 3 Vertical displacements at mid-span of the bridge

车速 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	w _{计算} / cm	w _{试验} / cm	误差 / %
20	0.167	0.170	2
30	0.196	0.194	-1

3 桥梁冲击系数讨论

现代桥梁车辆振动理论有了很大发展,特别是有限元数值计算方法的采用解决了非线性振动方程的求解,从而能够得到相对较为精确的计算结果。但是,由于车辆动力特性的复杂性和参数的不确定性,桥梁阻尼的离散性和桥面平整度的随机性,要想通过理论分析的途径来解决动力效应的计算问题也还有一定的困难,因此通过试验的方法得到桥梁在车辆荷载作用下的动力效应还是一种很重要的方法。

桥梁设计实践中车辆荷载的动力效应是通过经验的“冲击系数”公式来考虑。桥梁冲击系数的试验研究有 2 种方法:一种是动力挠度法,一种是动力应变法,本文采用前一种。另外,当桥梁影响线的加载长度可以容纳 2 辆以上车时,按加拿大安大略省规范建议对冲击系数进行折减,2 辆车 0.7,3 辆车 0.6,3 辆车以上 0.5。本桥影响线的加载长度可以容纳 3 辆以上车,据此折减系数为 0.5。将试验各工况下实测的动力挠度、冲击系数及折减后所得冲击系数值列于表 4。

表 4 桥梁挠度和冲击系数

Tab. 4 Vertical displacements and impact coefficients the bridge

项 目	跑车	跑车	跨中刹车	跨中刹车	桥面 L/4 跳车	跨中跳车	
	20 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	30 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	20 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	30 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	20 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	20 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	
w _{静载桥面挠度} / cm	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	
w _{桥面动挠度} / cm	0.630	0.654	0.933	1.106	1.106	1.187	
桥面冲击系数	折减前	0.370	0.422	1.028	1.404	1.187	1.580
	折减后	0.187	0.211	0.514	0.702	0.594	0.790
w _{静载拱肋挠度} / cm	0.373	0.373	0.373	0.373	0.373	0.373	
w _{拱肋动挠度} / cm	0.330	0.731	0.394	0.650	0.462	0.770	
拱肋冲击系数	折减前	0.000	0.960	0.056	0.743	0.239	1.064
	折减后	0.000	0.480	0.028	0.372	0.120	0.532

由表 4 的冲击系数表可见,动载对该桥的产生了较大的冲击系数值,试验结果中除跑车工况下拱肋实测动挠度有异常外,其余均较为合理。从跑车和刹车工况得到的冲击系数值看,速度对桥梁产生的动力效应的影响是非常显著的,体现在车速越高冲击系数值越大,且其增长程度较为剧烈(在概率意义上);从相同车速情况下的跑车、刹车和跳车工况看,三者的冲击系数值以跑车时最小,跳车时最大,刹车时居中,这与我们的常识是相一致的;从跳车工况看,桥面 1/4 处跳车时比跨中跳车时的冲击系数值小。

对该桥的冲击系数值分析可见, 桥面平整度的影响很大. 正是由于该桥在跨中位置桥面有较大的不平整度, 对该桥的车辆激振受力产生不利影响, 使得即使以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 跑车时桥面仍有 0.187 的冲击系数值, 大于规范规定值(本桥跨径 80 m, 按规范规定, 跨径超过 40 m 的钢筋混凝土拱桥的冲击系数为 0). 从几种工况下桥梁的冲击系数看, 以跨中跳车(相当于跨中桥面的平整度有突变)时为最大, 说明了大桥的维护中保持桥面, 特别是跨中附近桥面的平整度是很重要的.

拱肋在多数工况下的冲击系数均超出规范取值 0, 跨中跳车的工况下冲击系数甚至达到 0.532, 可见桥梁设计中应适当考虑车辆对拱肋的动力效应. 从拱肋与桥面两者的冲击系数对比看出, 由于该桥为下承式拱桥, 桥面系通过吊杆悬吊于拱肋上, 动载对拱肋的影响由于吊杆及桥面结构的减振作用而明显小于桥面, 且各工况下两者冲击系数之间不存在绝对的对比性, 甚至出现了 30 km 跑车时桥面冲击系数较为合理而拱肋冲击系数异常的情况. 因此, 冲击系数的研究与设计取值应该考虑拱肋与桥面系的差别.

从表 4 的总体数值来看由于实际行车条件的复杂性、多样性和随机性, 所测数据也呈现出一定的随机性, 因此利用概率、统计的数学方法进行桥梁动测试验的深入研究就尤为重要.

4 结语

1) 由桥梁固有振动特性的试验与有限元对比分析可见, 有限元计算具有相当的精确度, 大桥承受实际车辆行车的性能与桥梁设计值相一致, 说明桥梁不仅静力性能而且动力性能都满足设计要求.

2) 总体来说, 桥梁实测冲击系数较规范值大, 桥面平整度(特别是跨中附近桥面)对大桥的实际冲击系数影响很大. 考虑到我国大部分桥梁的桥面平整度相对较差, 桥梁设计中应适当考虑车辆对拱肋的动力效应.

3) 从大桥动载试验结果可见, 该型桥梁由于吊杆及桥面结构的减振作用, 动载对拱肋产生的动态增量明显小于桥面, 两者冲击系数差别较大, 应予以分别研究分析.

参考文献:

- [1] 陈宝春, 陈友杰, 刘玉擎. 钢管—钢管混凝土复合拱桥[J]. 桥梁建设, 2001(2): 17 - 20.
- [2] 孙潮, 陈宝春, 陈水盛. 钢管—钢管混凝土复合拱桥动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 48 - 52.
- [3] Huang D Z. Dynamic analysis of steel curved box girder bridges[J]. J Struct Engrg, ASCE, 2001, 6(6): 506 - 513.
- [4] Huang D Z, Wang T L, Shahawy M. Impact studies of multigirder concrete bridges[J]. J Struct Engrg, ASCE, 1993, 119(8): 2387 - 2402.
- [5] Wang T L, Huang D Z. Cable-stayed bridge vibration due to road surface roughness[J]. J Struct Engrg, ASCE, 1992, 118(5): 1355 - 1374.
- [6] 黄东洲. 钢管混凝土拱桥的车辆振动[A]. 十五届全国桥梁学术会议论文集[C], 上海: 同济大学出版社, 2002. 469 - 475.
- [7] 许士杰. 钢管混凝土拱桥动力特性及车桥相互作用研究[D]. 北京: 北方交通大学, 1999.
- [8] 毛清华, 项海帆. 公路桥梁车辆振动的理论和试验研究[J]. 土木工程学报, 1990, 23(2): 61 - 68.