

某连续刚构桥动力影响线的计算与研究

许永吉

(福建省高速公路养护工程有限公司,福州 350001)

摘要:选取福建省下白石大桥(连续刚构桥)作为研究背景,建立下白石大桥的 ANSYS 有限元模型。使用基于 MATLAB 平台的模态分析软件 MACEC,采用随机子空间法(SSI)对下白石大桥进行模态分析。根据分析结果,对下白石大桥有限元模型参数进行修正;利用修正后的有限元模型采用瞬态动力学分析功能求得其在移动荷载作用下的纵向应变时程曲线和动力影响线。为下一步车辆荷载效应评估奠定基础。

关键词:动力影响线;有限元模型;应变时程曲线;车辆荷载效应

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

为了对桥梁的车辆荷载进行准确评估,探索能反映运营桥梁真实车辆荷载随机性和时变性的车辆荷载模型,就必须获得桥梁的应变时程曲线和动力影响线^[1],本文以福建省高速公路上的连续刚构桥下白石大桥为背景工程,建立下白石大桥的 ANSYS 有限元模型,采用 MATLAB 平台的模态分析软件 MACEC 对大桥进行模态分析并校核,根据模态分析的结果对有限元模型参数进行修正,利用修正后的有限元模型计算分析获得桥梁的动力影响线。

1 背景工程

1.1 工程概况

福建省下白石大桥(图 1)是沈阳至海口国高主干线福鼎至宁德高速公路的特大桥。主桥为 145 m + 2 × 260 m + 145 m 四跨预应力混凝土刚构,全长 810 m,桥面宽为(0.5 + 11.00 + 0.5) + 0.5 + (0.5 + 11.00 + 0.5) = 24.5 m;设计荷载为汽超 - 20,挂 - 120,无人群荷载;设计时速为 80 km/h。主桥刚构根部梁高 14.00 m,跨中根部梁高 4.20 m,腹板根部厚 70 cm,跨中 40 cm,顶板厚度 28 ~ 40 cm,根部底板厚 140 cm,跨中底板厚 30 cm,

主桥上部结构按全预应力混凝土设计。采用三向预应力,主墩均采用双柱薄壁墩,墩身截面外轮廓为矩形,墩身横桥向宽度为 6 m,与主梁箱底同宽,顺桥向为 2.5 m。两墩柱顺桥向间距 6.5 m,墩身顺桥向壁厚 50 cm,横桥向壁厚 80 cm,5、6 号墩采身底部高度 3 m 范围内为实心段。7 号墩墩底实心段高度为 10.5 m,5、6 号墩采用群桩基础,7 号墩采用明挖墙式基础。上部构造采用挂篮悬浇,5、6 号墩采用平台施工桩基,以施工好的桩基为依托,采用底钢套箱施工,7 号墩基础采用钢围堰施工。



图 1 下白石大桥

1.2 下白石大桥有限元模型

1.2.1 计算模型

为得到下白石大桥的动力影响线,需建立下白石大桥有限元模型。根据下白石大桥的设计和竣工图纸,使用 ANSYS 软件建立,模型采用笛卡尔三轴坐标。Z 轴为桥的水平纵向,Y 轴为竖直方向,X 轴为水平横桥方向。全桥的有限元模型共有 28 250 个单元,42 975 个节点。

收稿日期:2014-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51178101);福建省教育厅科技项目(JA12041);福建省重点交通科技项目(200751)

作者简介:许永吉(1980-),男,福建连城人,博士生,主要从事大型桥梁安全性能评价方面的研究,(E-mail)civil0518@163.com

有限元模型如图2所示。



图2 下白石大桥有限元模型

1.2.2 单元类型和材料参数

采用有限元分析软件建立下白石大桥有限元模型,全桥采用 solid45 单元模拟,并采用用弹簧单元 combin14 模拟主桥的边界条件^[2]。确定的混凝土基本材料参数为:主桥箱梁采用 C60 混凝土,弹性模量 $E = 3.60 \times 10^4$ MPa,容重:245 KN/m³,密度:2450 Kg/m³,泊松比:0.167;桥墩墩身均采用 C50 混凝土,弹性模量 $E = 3.45 \times 10^4$ MPa,容重:245 KN/m³,密度:2450 Kg/m³,泊松比:0.167;5、6号桥墩承台采用 C30 混凝土,弹性模量 $E = 3.0 \times 10^4$ MPa,容重:245 KN/m³,密度:2450 Kg/m³,泊松比:0.170。

1.2.3 边界条件模拟

用 combin14 模拟主桥的边界约束^[2]。为了减少模型修正参数的数量,便于进行模型修正,主桥两端部的支座和伸缩缝对主桥的约束采用刚度相同的纵向和横向弹簧模拟其纵横向的摩擦,并用竖向弹簧模拟支座的竖向支撑。根据设计伸缩缝和支座参数,结合模型修正,确定弹簧参数为:福鼎方向竖向初始弹簧刚度取 8.0×10^7 N/m,纵向初始弹簧刚度为 4.0×10^7 N/m,横向初始弹簧刚度取 4.5×10^6 N/m,宁德方向竖向初始弹簧刚度取 8.0×10^7 N/m,纵向初始弹簧刚度取 4.0×10^7 N/m,横向初始弹簧刚度取 9.8×10^6 N/m;对主桥 5、6号桥墩墩台底部和 7号桥墩墩身底部施加三向固结约束;在桥墩位置,两幅桥的箱梁的横向连接采用三向弹簧约束模拟,竖向初始弹簧刚度取 10×10^7 N/m,纵向初始弹簧刚度取 10×10^6 N/m,横向初始弹簧刚度取 3.2×10^6 N/m。

1.2.3 模型参数修正

为了对下白石大桥的动力特性进行分析,首先需要取得下白石大桥健康监测系统的加速度监测子系统所得到的加速度数据。下白石大桥健康监测系统的加速度测试采用的是中国地震工程力学研究所的 941BA 型加速度传感器,最低测试频率范围为 0.1 Hz,灵敏度系数为 0.3 VS²/m。全桥共有 13 个断面布置了加速度传

感器,大桥监测项目布置如图3所示,全桥共 31 个加速度测点,其中横向、竖向加速度测点各 13 个,纵向加速度测点 5 个,采样频率为 200 Hz。加速度时程曲线如图4所示。基于 MATLAB 平台的模态分析软件 MACEC,采用随机子空间法 (SSI)^[3-5] 对下白石大桥进行模态分析,用峰值法 (PP) 对随机子空间法对随机子空间计算结果进行校核^[4],使得结果更加准确可信。由随机子空间法 (SSI) 得到竖向、横向和纵向的数据稳定图 (图5),竖向、横向和纵向的平均正则化的功率谱密度 (ANPS-DS) 曲线如图6所示。

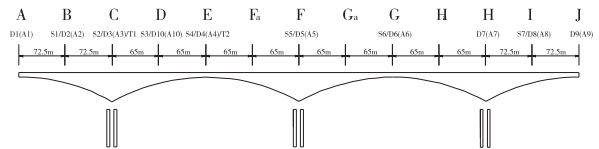
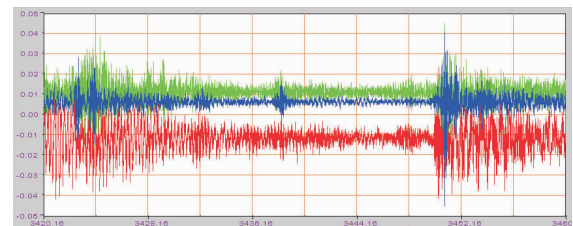
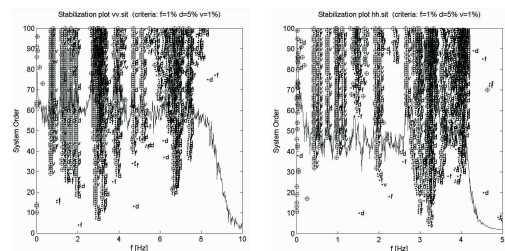


图3 大桥监测项目布置图

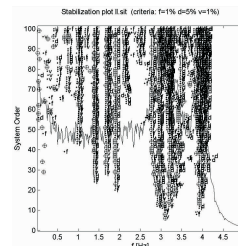


(下白石大桥边跨跨中截面,由上至下依次为纵向、横向、竖向加速度时程曲线)

图4 下白石大桥加速度时程曲线



(a) 竖向振动稳定图 (b) 横向振动稳定图



(c) 纵向振动稳定

图5 随机子空间法振动稳定图

根据以上模态分析结果,对下白石大桥模型参数进行修正,修正前后的参数见表1,其中 R_{v1} 为大桥两端支座的竖向弹簧刚度, R_{L1} 为大桥两端支座和伸缩缝的纵向弹簧刚度, R_{v2} 为两幅桥之间的横向连接的竖向弹簧刚度, R_{L2} 为两幅桥之间的横向连接的纵向弹簧刚度, R_{m1}

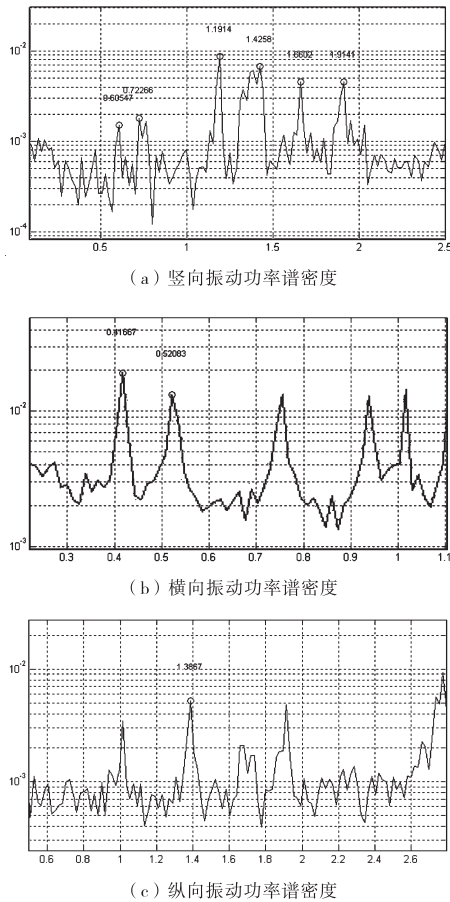


图 6 平均正则化功率谱密度曲线

为福鼎端支座和伸缩缝的横向弹簧刚度, R_{12} 为宁德端支座和伸缩缝的横向弹簧刚度, R_{13} 为两幅桥之间的横向连接的横向弹簧刚度, N 为大桥混凝土弹性模量的变化倍数。

表 1 频率修正后参数值与初始值比较

参数	初始值	修正值	修正率 (%)
R_{11}	8.0	11.6123	45.154
R_{12}	10	14.0536	40.536
R_{13}	4.0	8.7177	117.943
R_{14}	10	6.0523	-39.477
R_{15}	4.5	6.0	33.333
R_{16}	9.8	12.0	22.449
R_{17}	3.2	4	25.000
N	1.0	1.2	20.000

注: R_{11} 、 R_{12} 、 R_{13} 单位为 $\times 10^7 \text{ N/m}$, R_{14} 、 R_{15} 、 R_{16} 、 R_{17} 单位为 $\times 10^6 \text{ N/m}$ 。

通过模型参数修正后,由于各阶实测振型和计算振型还是有所差别,这可以通过模态保证准则 MAC 确定其相关程度。

$$MAC(\varphi_a, \varphi_c) = \frac{|\varphi_a^T \varphi_c|^2}{(\varphi_a^T \varphi_a)(\varphi_c^T \varphi_c)}$$

式中 φ_a 与 φ_c 分别代表计算与实测模态振型向量,如果模态完全相关,则 $MAC = 1.0$,如果模态完全不相关,则

$MAC = 0$ 。 MAC 值越接近于 1,则计算模态与实测模态的相关性就越好。得到实测和计算动力特性值对比见表 2。

表 2 实测与计算的功率特性值对比

振动方向	阶数	频率			MAC 值 (%)
		实测值 ①	计算值 ②	误差 (%) (②-①)/①	
竖向	1	0.682	0.647	-5.126	99.1
	2	0.807	0.833	3.284	92.6
	3	1.247	1.241	-0.481	91.1
	4	1.399	1.367	-2.287	89.5
	5	1.658	1.620	-2.292	98.6
	6	1.902	1.916	0.736	99.2
横向	1	0.417	0.396	-4.945	91.7
	2	0.523	0.522	-0.270	76.6
纵向	1	1.380	1.680	21.739	86.5

由表 2 可知,通过模型修正,有限元模型基本上能反映桥梁的动力特性,为动力影响线的计算奠定基础。

2 下白石大桥动力影响线的计算

结构在移动荷载的作用下,考虑其动力影响的内力计算是一个比较复杂的问题。在工程实践中,通常是将活荷载所产生的静内力值乘以冲击系数(或称动力系数) $1 + \mu$ 考虑其动力影响。冲击系数 $1 + \mu$ 一般由试验与理论分析相结合的方法得出半经验、半理论的仅与跨长有关的公式计算。将动力影响线简单地处理为静力影响线乘以动力系数是不适合的,因为一般情况,动力系数不是常数,它不仅与荷载作用位置有关,而且还与截面位置有关,其动力反应计算对每一个截面都是不同的^[6-7]。

为了对桥梁在车辆荷载作用下的荷载效应进行较为准确的评估,本文利用建立的下白石大桥有限元模型,在移动荷载的作用下求下白石大桥的动力影响线对于桥梁的动力影响线的计算,首先要计算桥梁结构在移动荷载作用下的一点处某一量值的时程曲线,然后将时程曲线横坐标根据时间按比例转换成桥跨长度,这样就得到了关心点处某一量值的动力影响线。

应用 ANSYS 有限元软件进行模拟计算,制定分析类型为 Structural,程序分析方法为 h-method。车辆过桥的模拟需要用到瞬态动力学分析功能(时间历程分析,用于确定任意的随时间变化荷载的结构动力学响应的一种方法)。可以用瞬态动力学分析确定结构在静荷载、瞬态荷载和简谐的随意组合作用下随时间变化的位移、纵向应变、应力及内力。本文采用的是瞬态动力学分析方法中的完全法(Full Method)^[2]。

进行动力影响线计算时,以一个大小为 1 kN 的集中力施加在桥面的中心线上,将这个集中荷载沿着桥梁的纵向以 80 km/h 的速度移动,从宁德端向福鼎端移

动,计算时将这个集中荷载过桥的时间分为410个荷载步。为了提高精度并考虑计算机的运算能力,设置每个荷载步包含2个荷载子步。进行加载求解后,提取53 316号单元中包含的500 077号节点的纵向(z方向)应变(即E断面纵向应变2号测点处的纵向应变值),得到的纵向应变时程曲线见图7(a),将其横坐标由时间换算成桥跨长度,得到的动力影响线如图7(b),同样,B断面纵向应变2号测点处应变时程曲线和影响线如图8所示,动力影响线由一系列的离散点组成。

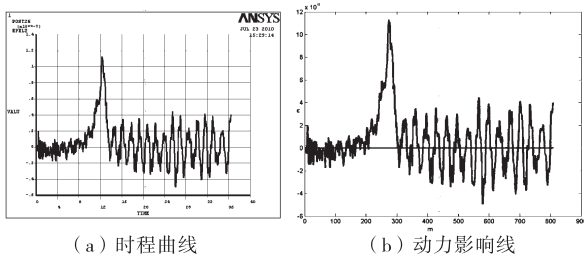


图7 E断面2号纵向应变测点处纵向应变时程曲线及其动力影响线

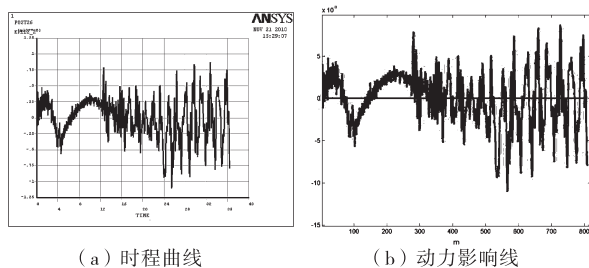


图8 B断面2号纵向应变测点处纵向应变时程曲线及其动力影响线

3 结论

(1) 本文利用有限元分析软件 ANSYS 建立下白石大桥的有限元模型,主桥两端部的支座和伸缩缝对主桥

的约束采用刚度相同的纵向和横向弹簧模拟其纵横向的摩擦,并用竖向弹簧模拟支座的竖向支撑,达到精确建模的效果。

(2) 基于 MATLAB 平台的模态分析软件 MACEC,采用随机子空间法 (SSI) 对下白石大桥进行模态分析,通过模态分析的结果对有限元参数进行修正。

(3) 利用有限元程序中 h - method 的程序分析方法,使用瞬态动力学分析中的完全法确定结构的动力影响线。

(4) 精确的动力影响线的建立为下一步桥梁车辆荷载模型的建立奠定基础。

参考文献:

- [1] Colin C C, Eugene J O, Geoff J M. Characteristic traffic load effects from a mixture of loading events on short to medium span bridges[J]. Structural Safety, 2008, 30: 394-404.
- [2] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 陈照全. 既有桥梁车辆荷载的随机过程模型研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
- [4] 许肇峰, 王强, 刘仰韶. 基于 WIM 的广东省公路桥梁车辆荷载模型研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(6): 39-44.
- [5] 孙守旺, 孙利民. 基于实测的公路桥梁车辆荷载统计模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012(2): 198-204.
- [6] 郭彤, 李爱群, 赵大亮. 用于公路桥梁可靠性评估的车辆荷载多峰分布概率模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 763-766.
- [7] 梅刚, 秦权, 林道锦. 公路桥梁车辆荷载的双峰分布概率模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003(10): 1394-1396, 1404.

Calculation and Research of Influence line for Dynamic of Continuous Rigid Frame Bridges

XU Yongji

(Fujian Expressway Maintenance Engineering Limited Company, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Selecting the continuous rigid frame bridge-Fujian Xiabaishi bridge as research background, the ANSYS finite element model of Xiabaishi bridge is established. Adopting the modal analysis software MACEC based on the MATLAB platform, the Xiabaishi bridge is model analysed by using stochastic subspace (SSI). According to the results of modal analysis, the finite element model parameters of Xiabaishi bridge are corrected; Longitudinal strain time travel curve and influence line for dynamic under moving load are obtained through the transient dynamics analysis under the modified finite element model. All of that make the foundation of vehicle load effect evaluation.

Key words: influence line for dynamic; finite element model; strain time travel curve; vehicle load effect