

文章编号: 1000-4750(2008)08-0031-05

浮桥大位移理论计算方法研究及 与动态测试结果的比较分析

*江召兵, 陈徐均, 黄亚新, 沈 庆

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏, 南京 210007)

摘 要: 为了研究浮桥在重载通过时的大位移变形, 把浮桥简化成弹性基础梁, 对浮桥在荷载作用下的动力响应进行了建模和计算。对浮桥在静态下的位移、单荷载和 2 车车队下的动态响应进行了计算, 并与相应条件下的动态测试结果进行了比较分析。通过计算与试验的对比分析得出: 利用弹性基础梁的理论计算结果, 可以满足工程的精度要求, 而且计算简便易行, 能快速计算各个工况下浮桥的动力响应和位移大小。

关键词: 浮桥; 弹性基础梁; 动态测试; 大位移; 移动荷载

中图分类号: U448.19 **文献标识码:** A

ANALYTICAL METHOD FOR FLOATING BRIDGE BASED ON LARGE DISPLACEMENT THEORY AND COMPARISON THE RESULTS WITH EXPERIMENTAL DATA OF DYNAMIC TESTS

*JIANG Zhao-bing, CHEN Xu-jun, HUANG Ya-xin, SHEN Qing

(Engineering Institute of Engineering Corps, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: In order to estimate the vertical displacements of a floating bridge subjected to moving heavy loads, the floating bridge is simplified as an elastic-base-beam, and then the dynamic response is solved accordingly. The static vertical displacements and the dynamic responses induced by a single moving load or two moving loads are calculated and compared with those obtained by dynamic displacement tests under the same conditions. It is shown that the calculated results by the proposed method can satisfy the precision requirement in engineering. Moreover, the method can be performed conveniently for the estimation of dynamic responses and vertical displacements of the floating bridge in different cases.

Key words: floating bridge; elastic-base-beam; dynamic test; large vertical displacement; moving load

对带式浮桥在荷载下的响应, 比较成熟的是把水介质看成弹性基础进行处理^[1-2]。弹性基础梁的静力响应有精确的解析解, 而动力响应则可用积分法进行求解。带式浮桥的研究, 可用弹性基础梁理论分析移动荷载作用下锚泊浮桥在静水中的振

动^[3]; 利用超单元对整个桥梁进行单元划分求解, 可以得出浮桥静态响应^[4], 也可求得浮桥在移动荷载下的动力响应^[5]; Zhao 利用有限元数值计算方法对流体控制方程 Navier-Stokes 方程进行求解、带式浮桥则用多体动力学理论进行计算^[6], 得出了带式

收稿日期: 2006-12-26; 修改日期: 2007-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50309018)

作者简介: *江召兵(1979—), 男, 湖南郴州人, 博士生, 从事浮桥设计理论与方法(E-mail: owen9020@126.com);

陈徐均(1972—), 男, 江苏南通人, 副教授, 博士, 从事浮式工程结构的动力分析研究(E-mail: xjchen@sjtu.edu.cn);

黄亚新(1962—), 男, 江苏常州人, 教授, 博士, 从事浮桥设计理论与方法(E-mail: yxhuang62@126.com);

沈 庆(1942—), 男, 浙江嘉兴人, 教授, 博导, 从事浮式工程结构的动力分析研究(E-mail: sqwln7179@126.com).

浮桥与水介质耦合情况下的动力响应。

文献[5]中详细分析了非线性连接对带式浮桥动力响应的影响,但是建模复杂,计算耗时多;文献[6]中精确计算了流体粘性对带式浮桥的影响以及流场在带式浮桥作用下的变化,但是对于快速移动重载的惯性力作用并没有考虑。

对通载浮桥进行动态位移测试,可以进一步了解浮桥的通载性能和动力响应特性,为浮桥的设计、制造和架设理论提供参考数据。本文理论计算与试验的比较,既检验了理论计算的精度,也为今后的浮桥研究提供了一种简便可靠的计算方法,为分析高速荷载作用下浮桥的动力响应提供了理论指导。

1 带式浮桥计算的工程简化处理方法

把带式浮桥简化成弹性基础梁,假设梁与 x 轴重合,则梁的运动微分方程^[7]为:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} + ky = P \quad (1)$$

其中: $y(x,t)$ 为梁产生的振动位移; $m(x)$ 为梁的质量分布; $c(x)$ 为阻尼系数; $k(x)$ 为弹性基础的弹性系数; $P(x,t)$ 为作用在梁上的静压力,荷载在梁上运动时,假定速度为常数 v 。

求解方程(1)有多种方法,静力求解方法有梁单元离散有限元法、有限条法、壳单元离散的有限元法等^[8]。动力响应可用 Rayleigh 法^[2]、对整个桥梁进行超单元划分^[5]、综合模态法^[9-10]等进行求解和分析。本研究用振型叠加法进行求解,从下面的求解可以看出:这种方法物理意义清晰,推导简便,通用性强,特别适合编制通用程序和对分析。方程(1)的解可以用分离变量法求得,假定解的形式为:

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(t) X_i(x) \quad (2)$$

其中: $X_i(x)$ 为满足于端点条件的各振型函数; $\phi_i(t)$ 为时间的函数。假设梁的两端简支,长度为 L ,那么满足端点的振型函数可取为:

$$X_i(x) = \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right), \quad i=1, 2, \dots, \infty \quad (3)$$

假定梁的抗弯刚度 EI 是常数;梁是等截面的,且质量均匀分布,有 $m(x) = \bar{m}$;弹性基础的弹性系

数 k 为常数,对带式浮桥而言,弹性基础的弹性系数为 $\rho g B$, 其中 ρ 为水的密度, B 为带式浮桥的水线面宽度;阻尼系数 c 为常数,阻尼系数可以根据阻尼比来确定,这里阻尼比参照文献[5]取 5%。

由移动重载引起的惯性力为:

$$f = -\frac{P}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{P}{g} \left(v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2v \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) \quad (4)$$

在上式中,第一项表示由于梁的振动过程产生的曲率,使移动重载在梁上移动而产生的离心加速度;第二项表示由于移动重载的移动,使梁的竖向速度产生变化而引起的竖向加速度;第三项表示移动重载所在位置梁振动的竖向加速度^[11]。

在实际工程中,移动重载在梁上的运动体现为一个或者有限个集中常量荷载。为计算方便,引进 Dirac 函数,Dirac 函数的特性有:

$$\delta(x-s) = \begin{cases} 1, & x=s \\ 0, & x \neq s \end{cases} \quad (5)$$

$$\int_a^b \delta(x-s) f(x) dx = f(s) \quad (6)$$

把移动重载看成集中常量荷载,则移动重载作用力可表示为:

$$P(x,t) = \delta(x-s) P_0 \quad (7)$$

移动重载在时刻 t 作用于 $x=vt$ 处。

利用虚功原理可推导满足式(1)的方程为:

$$M \ddot{\phi} + C \dot{\phi} + K \phi = F \quad (8)$$

式中, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]^T$ 为振型位移函数,右端项为:

$$F = [P_0 \sin \frac{\pi vt}{L}, P_0 \sin \frac{2\pi vt}{L}, \dots, P_0 \sin \frac{N\pi vt}{L}]^T \quad (9)$$

M 为广义质量矩阵,即:

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & \rho_M \Phi_{12} & \cdots & \rho_M \Phi_{1N} \\ \rho_M \Phi_{21} & M_{22} & \cdots & \rho_M \Phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_M \Phi_{N1} & \rho_M \Phi_{N2} & \cdots & M_{NN} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中, $M_{ii} = \frac{\bar{m}L}{2} + \rho_M \Phi_{ii}$, $\rho_M = \frac{P_0}{g}$, $\Phi_{ij} = \sin \frac{i\pi vt}{L}$ 。

$\sin \frac{j\pi vt}{L}$ 。 K 为广义刚度矩阵,即:

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & \xi \gamma_{12} & \cdots & \xi \gamma_{1N} \\ \xi \gamma_{21} & K_{22} & \cdots & \xi \gamma_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi \gamma_{N1} & \xi \gamma_{N2} & \cdots & K_{NN} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: $K_{ii} = \eta + \xi \gamma_{ii}$; $\eta = \frac{\pi^4 EI i^4}{2L^3} + \frac{kL}{2}$; $\gamma_{ij} = (\frac{j\pi}{L})^2$.

$\xi = -\frac{P_0 v^2}{g}$ 。C 为广义阻尼矩阵, 即:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & \chi \Psi_{12} & \cdots & \chi \Psi_{1N} \\ \chi \Psi_{21} & C_{22} & \cdots & \chi \Psi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi \Psi_{N1} & \chi \Psi_{N2} & \cdots & C_{NN} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: $C_{ii} = \frac{cL}{2} + \chi \Psi_{ii}$; $\chi = -\frac{2P_0 v}{g}$; $\Psi_{ij} = \frac{j\pi}{L} \sin \frac{i\pi v t}{L} \cos \frac{j\pi v t}{L}$ 。

由于移动重载在梁上不断地运动, 广义质量矩阵、广义阻尼矩阵和广义刚度矩阵的系数都是随着时间不断变化的, 方程(8)构成了一个时变二阶微分方程组, 这样的方程组不能求出其精确解, 一般可采用逐步积分法求出其数值解。

2 动态测试技术

实测浮桥和测点布置如图1所示, 在河中部分两侧尖舟羊角上布置10只垂直位移测量装置, 整个浮桥由15只河中舟、2只岸边舟和2只岸跳板组成, 其中河中舟的长、宽、高分别为 6.70 m, 8.00 m 和 1.07m, 空载吃水为 0.19 m, 舟节间的连接方式类似于限位铰, 跳板与河岸的连接方式为搭接, 水深 2m—4 m, 流速为零。

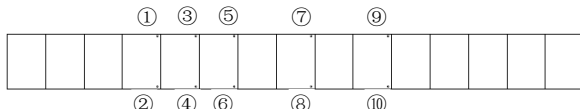


图1 浮桥组成和测点布置图

Fig.1 Composition of the floating bridge and the test points distribution

为了满足测点数量多和记录时间长的要求, 在浮桥测点外侧设置标尺桩, 标尺桩由植于河底的钢管桩和捆于其上的刻度尺组成。在浮桥测点上设置指针, 指针将随着浮桥的上下振动而移动, 指向标尺的不同位置, 以显示浮桥的上下位移量。标尺桩和指针如图2所示。在浮桥上每个指针处配置1台数字摄像机, 用于记录指针在标尺桩上移动的整个过程。数字摄像机的机内显示时间可以精确到 1.0s, 数据采集到计算机后, 每秒有25帧画面, 即其精度可以达到 1/25s。10台摄像机的时间同步性通过与同一秒表(精确到 0.01s)的时间差的不同而定位。动态测试具体操作方法和数据分析结果可参阅文献[12]。

献[12]。



图2 指针与标尺桩

Fig.2 Pointer and staff gauge

3 理论计算方法与试验结果的比较

在比较理论计算值与试验值时, 首先从静态位移着手, 同时与他人用有限单元分析方法的计算值进行了比较, 然后从不同重量的单荷载在慢速和快速通过时浮桥的位移大小等方面进行了列表比较, 最后从车队行进时浮桥的动态响应进行了对比。

3.1 浮桥单载荷作用下静态位移的比较

设荷载的重量为 20.5t, 文献[5]利用有限元对整个浮桥进行了单元划分, 得出了浮桥的静态荷载作用下的位移曲线, 利用弹性基础梁的处理方法, 也可得浮桥的位移曲线, 两者与试验的比较如图 3 所示。从图 3 中可以看出: 利用弹性基础梁的计算方法与他人的计算和试验较为吻合, 可以满足精度的要求, 而且本文的方法与他人的计算方法相比更为简便快捷, 实用性较强。

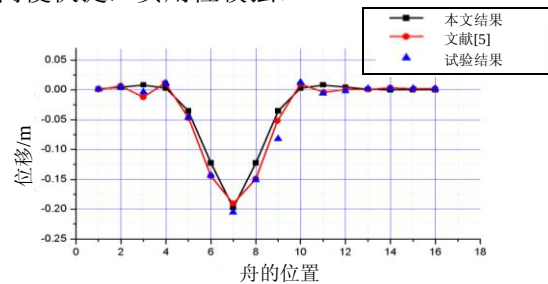


图3 静载状态下浮桥计算值与试验值的比较

Fig.3 Comparison between the calculated and test results of the floating bridge at static state

3.2 浮桥在移动单载荷作用时动态位移的比较

因为车辆在同一时刻经过同一个舟上的两个测点, 在试验数据的处理上, 试验的数据值为同一个舟上两个测点对应值的平均值。如图 1 一共有 5 对测点, 在每对测点的垂直位移达到最大时记录数据, 显然地, 当荷载移动到测点时测点的垂直位移达到最大, 在计算时, 亦是当移动荷载到达测点所对应的位置时写出数据。

表 1 为荷载的重量为 13.5t，平均行车速度为 1.85m/s 时试验平均值与计算值的比较。

表 2 为荷载的重量为 13.5t，平均行车速度为 5.29m/s 时试验平均值与计算值的比较，“/”表示无

该点测量值，下同。

表 3 为荷载的重量为 20.5t，平均行车速度为 3.58m/s 时试验平均值与计算值的比较。

表 1 各测试点试验位移平均值与计算值的比较(V=1.85m/s)
Table 1 Comparison between the test and calculated displacements (V=1.85m/s)

编号	第一对测点最大		第二对测点最大		第三对测点最大		第四对测点最大		第五对测点最大	
	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
1,2	13.5	12.92	7.3	7.99	1.3	2.28	0.7	-0.68	0.9	0.02
3,4	8.15	8.07	11.3	12.98	8.25	8.01	-1.25	-0.07	-0.4	-0.17
5,6	0.5	2.31	8.25	7.98	11.6	12.9	1.35	2.23	-0.25	-0.51
7,8	-0.5	-0.65	-0.5	-0.17	0.2	2.32	10.8	12.97	0.3	2.45
9,10	-0.35	-0.04	-0.2	-0.29	-0.2	-0.59	0.1	2.26	11.25	13.04

表 2 各测试点试验位移平均值与计算值的比较(V=5.29m/s)
Table 2 Comparison between the test and calculated displacements (V=5.29m/s)

编号	第一对测点最大		第二对测点最大		第三对测点最大		第四对测点最大		第五对测点最大	
	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
1,2	-	13.27	-	7.53	-	1.63	-	-0.35	-	-0.08
3,4	9.65	7.98	14	13.7	12.35	8.46	-1.45	-0.3	-1.05	-0.17
5,6	0.2	2.4	11.35	8.49	13.8	13.74	1.1	1.6	-0.5	-0.78
7,8	0.3	-0.13	-3.9	0.01	-5.3	1.9	11.2	13.43	3	2.34
9,10	-1.9	-0.43	-1.7	-0.14	0.05	0.05	1.6	2.35	13.15	13.42

表 3 各测试点试验位移平均值与计算值的比较(V=3.58m/s)
Table 3 Comparison between the test and calculated displacements (V=3.58m/s)

编号	第一对测点最大		第二对测点最大		第三对测点最大		第四对测点最大		第五对测点最大	
	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
1,2	-	19.82	-	12.4	-	3.51	-	-1.18	-	-0.19
3,4	13.0	12.4	17.5	19.87	12.55	12.46	-1.45	-0.51	-0.85	-0.21
5,6	2.0	3.42	13.3	12.52	19.3	20.15	9.0	3.43	-1.1	-0.88
7,8	-0.7	-1.06	-2.4	-0.21	5.5	3.86	17.3	20.21	2.8	3.27
9,10	0.8	-0.23	0.4	-0.69	-0.9	-1.15	2.5	3.47	20.8	19.99

由表 1—表 3 可以看出：三种工况下大部分测点的试验值与计算值比较接近，特别是各测点的最大位移(表格中的阴影部分)吻合较好，对于看起来误差较大的地方，如表 1 中第四对测点、表 2 中第四对测点、表 3 中第二对测点和第四对测点，可以认为是由于试验误差过大引起的。

3.3 浮桥在移动车队作用时动态位移的比较

设荷载的重量为 20.5t，2 辆车组成的车队以平均速度 2.91m/s 通过浮桥，前后两车的间距为 58.3m，图 4 为试验值与计算值的比较。试验值是从第一辆车通过第三个舟时开始记录数据，从图 4 中可以看出，试验值和计算值的两个最大位移非常相近。从理论分析来看：车辆到达 6 号测点时位移应该最大，6 号测点所在的位置为 40.2m，车辆以

2.91m/s 前进，第一辆车到达 6 号测点时的时间应为 13.8s，第二辆车到达 6 号测点的时间应该为 33.8s，从图 2 中可以看出，理论预测与试验值和计算值都比较符合。

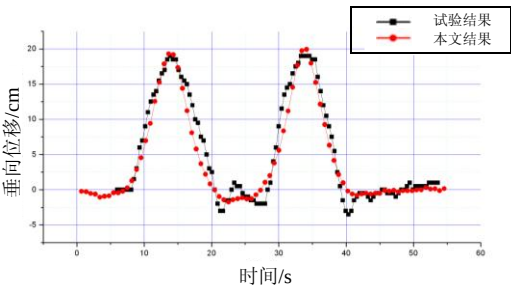


图 4 20.5t 荷载 2 车车队低速行驶时 6 号测点位移的位移响应
Fig.4 The displacement response with time going induced by two 20.5 t cars with middle speed passing the 6th pointer

设 2 车车队以平均速度 3.91m/s 通过浮桥,前后两车的间距为 60.3m,图 5 为试验值与计算值的比较。从图 5 中可以看出,试验值和计算值的两个最大位移非常相近。从理论分析来看:车辆到达 6 号测点时位移应该最大,6 号测点所在的位置为 40.2m,车辆以 3.91m/s 前进,第一辆车到达 6 号测点时的时间应为 10.3s,第二辆车到达 6 号测点的时间应该为 25.7s。从图 5 中可以看出:试验值和计算值符合得比较好,最大位移出现的时间也比较接近。

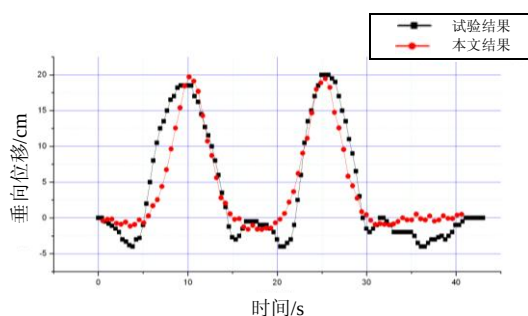


图 5 20.5t 荷载 2 车车队中速行驶时
6 号测点位移的位移响应

Fig.5 The displacement response induced by two 20.5t cars passing the 6th pointer

4 结论

本文利用弹性基础梁的方法对浮桥进行了简化处理,通过在静态和各动态情况下对浮桥大位移动力响应与测试结果的比较,可得出如下结论:

(1) 把浮桥简化成弹性基础梁计算的精度在工程上可以接受,而且数值计算简便易行,适用于各工况下浮桥的响应。

(2) 不管是在静载还是在动载情况下,用本文的方法计算出的最大位移与试验值吻合得都较好。

(3) 本文的方法不仅可以计算在荷载作用下浮桥的静态位移,也可以计算浮桥在单荷载、多荷载作用下的动力响应,而且计算值与试验值符合得较好。

本文提出的理论计算方法还可预测快速甚至是高速下浮桥的动力响应,但是没有考虑来流和入射波对带式浮桥的影响,也没有考虑带式浮桥的多体效应和三维扭曲变形,更精确的方法应包括带式浮桥与水介质的耦合作用、多体之间的相互作用、带式浮桥间隙的存在和扭曲对带式浮桥动力响应的影响,上述问题都有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 林铸明,陈徐均. 移动载荷作用下弹性基础梁的计算[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(1): 45—48.
Lin Zhuming, Chen Xujun. Calculating for elastic base beam under action of moving loads [J]. Journal of People's Liberation Army University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 5(1): 45—48. (in Chinese)
- [2] 王建平,李俊爱,陈以清,郑峰. 利用 Rayleigh 法计算连续梁带式浮桥通载时动力响应[J]. 工兵装备研究, 2005, 24(2): 4—7.
Wang Jianping, Li Jun'ai, Chen Yiqing, Zheng Feng. Calculation on dynamical response of continuous beam floating bridge with loads based on rayleigh method [J]. Engineer Equipment Research, 2005, 24(2): 4—7. (in Chinese)
- [3] Wu Jong-Shyong, Shih Po-Yun. Moving-load-induced vibrations of a moored floating bridge [J]. Computers & Structures, 1998, 66(4): 435—461.
- [4] 付世晓,崔维成,林铸明,陈徐均. 间隙对拼组式带式浮桥静态响应的影响分析[J]. 船舶力学, 2004, 8(4): 86—94.
Fu Shixiao, Cui Weicheng, Lin Zhuming, Chen Xujun. Effect of gaps on static response of a belt floating bridge [J]. Journal of Ship Mechanics, 2004, 8(4): 86—94. (in Chinese)
- [5] 付世晓. 锚泊弹性浮体及通载带式浮桥的非线性水弹性响应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
Fu Shixiao. Nonlinear hydroelastic analyses of flexible moored structures and floating bridges [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005. (in Chinese)
- [6] Zhao Yubo. Numerical simulations of constrained multibody systems [D]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong, 2005.
- [7] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: McGraw-Hill Incorporation, 1975.
- [8] 吴广怀,孙芦忠,沈庆,刘艇. 有限条法在混凝土浮箱桥结构分析中的应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2000, 1(3): 60—63.
Wu Guanghuai, Sun Luzhong, Shen Qing, Liu Ting. The finite strip method applied in the analysis of concrete pontoon bridge [J]. Journal of People's Liberation Army University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2000, 1(3): 60—63. (in Chinese)

(参考文献[9]—[12]转第 47 页)