

移动荷载作用下三塔悬索桥的强迫振动研究

冯兆祥¹, 陈亮², 缪长青²

(1. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏泰州 225321; 2. 东南大学土木工程学院, 南京 210096)

[摘要] 针对泰州大桥开展结构动力特性计算, 分析了不同移动速度以及不同移动荷载大小对于三塔两跨悬索桥结构动力响应的影响。结果表明, 三塔两跨悬索桥的一阶竖弯振动基频约为 0.08 Hz, 远低于载重汽车的固有频率, 不会形成共振条件。简单的移动荷载作用下三塔两跨连续支承悬索桥的内力、位移响应与同等静力荷载作用效果比较接近。移动荷载的质量越大、速度越大, 结构的内力、位移响应就越大, 并与车重呈近似正比例关系。结构内力、位移的荷载放大系数不随移动荷载质量的大小而改变。

[关键词] 动力特性; 强迫振动; 响应; 荷载放大系数

[中图分类号] U448.25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0080-05

1 前言

悬索桥以跨越能力强、受力简单、轻型美观、抗震能力好, 而成为跨越大江大河、海峡港湾等交通障碍的首选桥型^[1]。由于大跨悬索桥的柔度大, 车辆荷载很容易导致其局部动力行为的改变^[2], 最终影响桥梁疲劳寿命^[3]。车辆荷载是桥跨结构受到的主要活荷载。移动的车辆荷载作用下, 结构将打破其原来的静止状态发生振动, 结构的内力、变形也将随时间不断发生改变。文章通过建立泰州大桥有限元模型研究三塔两跨悬索结构在多种移动荷载工况作用下的非线性动力响应特征, 为研究三塔两跨悬索桥在实测交通荷载下的耐久性研究奠定基础。

2 有限元模型及动力特性分析

采用通用有限元程序 ANSYS 建立泰州大桥空间有限元模型^[4,5], 并在此基础上进行非线性结构动力特性分析^[6]。主缆和吊索离散为具有初始轴力的空间缆索单元, 主缆按吊杆吊点位置进行离散,

采用只受拉的空间杆单元 Link10 进行模拟; 加劲梁、中塔、边塔均离散为空间梁单元, 加劲梁按照吊杆吊点和吊装节段离散。桥面铺装等二期恒载通过折算密度计入主梁模型中, 只计质量不计刚度, 这样能避免加劲梁因为质量单元产生不必要的高阶振型。主缆锚固处和中塔、边塔的底部采用完全固接; 加劲梁与中塔在横桥向的位移和顺桥向的转动采用主从约束, 与边塔在横桥向、竖向和顺桥向的转动采用主从约束; 主缆与塔顶自由度全部耦合。中塔处加劲梁和桥塔在纵向采用弹性约束, 用 Link8 单元模拟。

表 1 给出了有限元分析得到的泰州大桥自振特性。大桥基频为 0.084 436 Hz, 结构周期较长, 符合典型柔性结构的一般规律^[7]。第一阶振型为主梁反对称侧弯, 与双塔单跨悬索桥第一阶主梁正对称侧弯振型不同, 但是三塔两跨悬索桥的一阶反对称侧弯振型在任意一个主跨范围内都相当于双塔单跨悬索桥的一阶正对称侧弯振型。

[收稿日期] 2012-03-15

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B03); 国家自然科学基金资助项目(51078080); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2008316); 江苏省“333 高层次人才培养工程”专项资助

[作者简介] 冯兆祥(1968—), 男, 江苏姜堰市人, 研究员级高级工程师, 研究方向为大跨径桥梁工程; E-mail: tzbridge@163.com

表 1 泰州大桥自振特性

Table 1 Natural vibration characteristics of Taizhou Bridge

阶数	频率/Hz	振型描述
1	0.084 436	主梁一阶反对称侧弯
2	0.084 907	主梁一阶反对称竖弯
3	0.106 78	主梁一阶对称侧弯
4	0.114 35	主梁二阶反对称竖弯
5	0.117 19	主梁二阶对称竖弯

3 移动荷载下的强迫振动影响

从桥跨结构的动力响应分析角度而言,荷载的冲击作用源于 3 个方面^[8]:理想的移动荷载作用桥面引起桥跨结构的振动,引起动力放大;车辆自身的振动使其加载在桥面上的力也有一定的波动;桥面不平整会引起车辆跳动导致冲击作用。三者之间相互影响相互联系,车与桥跨结构的振动相互耦合,桥面不平也会引起车、桥的振动。从泰州大桥自振特性分析可知,大桥的一阶竖弯振动基频远低于载重汽车 2~5 Hz 的固有频率^[9]。因此该类结构很难像简支梁那样在临界速度下形成共振条件,荷载的动力效应主要是载重汽车在行驶过桥并遇到桥面不顺时的局部冲击作用。

对于大跨度三塔悬索公路桥梁,由于车辆质量与桥梁质量相比小得多,所以进行大桥整体结构动力响应计算求解过程中,可以忽略移动荷载车辆质量。这样既避免了求解变系数微分方程的困难,又可以得到足够精确的解。

3.1 单个荷载过桥时结构的动力响应

一个 50 t 的移动荷载由桥跨的左端进入桥梁结构,并以匀速 70 km/h 的速度通过整个桥梁。图 1~图 4 给出了加劲梁的内力、位移计算结果。为便于查看图形和分析结果,图中将横轴取为荷载所经过的桥面位置,纵轴取为结构不同部分相应于荷载所在位置结构的内力、位移量。挠度以向下为负,向上为正。

由计算结果可知,匀速移动荷载作用下泰州桥的加劲梁竖向挠曲振动效应并不明显。荷载刚刚进入桥梁时,荷载对静止的桥梁产生了一个较强的冲击荷载作用,结构的挠度响应最为明显。荷载经过桥跨 1/4 点和 3/4 点时,加劲梁产生了较大的振幅。荷载在整个桥面移动的过程中,跨中点的反向挠度最大,左右主跨加劲梁的振动规律比较对称。

移动荷载作用下,加劲梁的弯矩时程变化规律

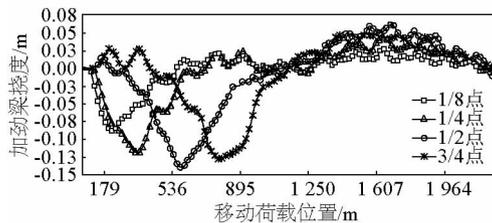


图 1 左主跨分点竖向挠度影响线

Fig. 1 Vertical deflection influence line at equinox of left main span

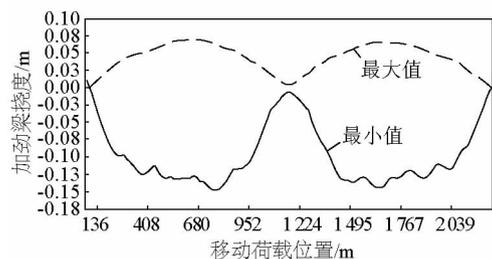


图 2 加劲梁竖向挠度影响线峰值包络线

Fig. 2 Peak value envelope of stiff girder vertical deflection influence line

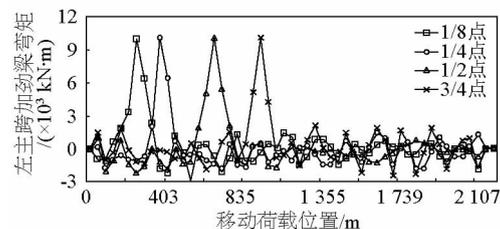


图 3 左主跨分点加劲梁弯矩影响线

Fig. 3 Stiff girder bending moment influence line at equinox of left main span

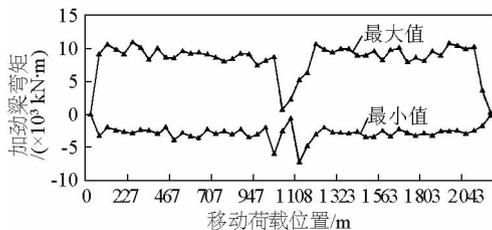


图 4 加劲梁弯矩峰值包络线

Fig. 4 Peak value envelope of stiff girder bending moment

和同等荷载静力计算结果几乎一致,弯矩波动幅度较小。荷载在加劲梁所处位置时弯矩最大。移动荷

载作用下,加劲梁端部弯矩较小,中间桥塔位置加劲梁负弯矩较大。

3.2 荷载以不同速度过桥时结构的动力响应

一个 50 t 的移动荷载由桥跨的左端进入桥梁结构,分别以匀速 30、50、70、90 km/h 和 110 km/h 的速度通过整个桥梁。由上述分析可知,在主跨结构主梁的四分点位置附近的动力效应比较明显,因此应该重点分析主跨四分点位置的内力、位移,如图 5 ~ 图 8 所示。

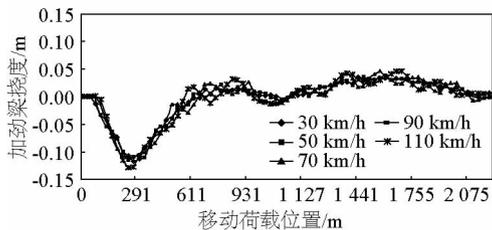


图 5 左主跨 1/4 分点竖向挠度影响线
Fig. 5 Vertical deflection influence line at 1/4 equinox of left main span

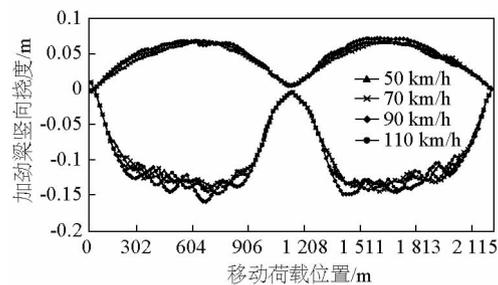


图 6 加劲梁竖向挠度影响线峰值包络线
Fig. 6 Peak value envelope of stiff girder vertical deflection influence line

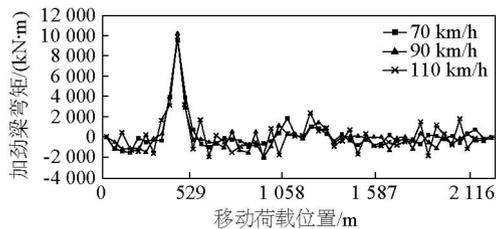


图 7 左主跨 1/4 分点加劲梁弯矩影响线
Fig. 7 Stiff girder bending moment influence line at 1/4 equinox of left main span

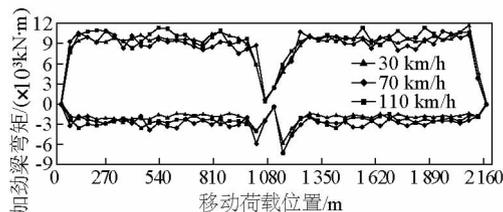


图 8 加劲梁弯矩峰值包络线
Fig. 8 Peak value envelope of stiff girder bending moment

由计算分析可知,加劲梁竖向弯矩和吊索张力受移动荷载移动速度变化的影响较小,移动荷载速度由 30 km/h 变化到 110 km/h,加劲梁弯矩放大系数和主缆张力放大系数均不超过 1.04。

移动荷载匀速经过桥面时,结构不同位置的内力、位移相对于等同静力荷载作用时的放大系数可见表 2。

表 2 加劲梁内力放大系数表

Table 2 Amplifying coefficient table of stiff beam internal force

位置	左主跨				右主跨			
	1/8	1/4	1/2	3/4	1/8	1/4	1/2	3/4
加劲梁挠度	1.04	1.01	0.99	1.02	1.04	1.01	0.99	1.02
加劲梁弯矩	1.02	1	1	1.01	1.02	1	1	1.01

3.3 以不同大小荷载过桥时结构的动力响应

一个移动荷载以匀速 70 km/h 由桥跨的左端进入桥梁结构,移动荷载质量大小分别取 50、100、150 t 和 200 t,以考察不同大小的移动荷载质量过桥时结构的内力、位移响应变化情况。四分点位置的

内力、位移计算结果如图 9 ~ 图 12 所示。

由计算分析可知,不同大小的荷载以相同的速度经过桥面时加劲梁的挠度和弯矩振动幅度有所差别。移动荷载质量越大,加劲梁的挠度和弯矩振动幅度越大,并呈线性比例关系。

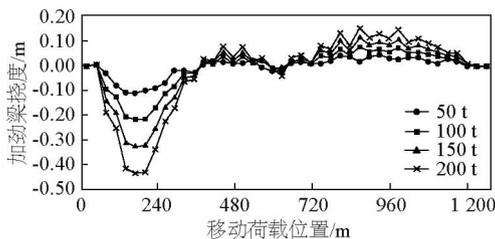


图9 左主跨1/4分点竖向挠度影响线

Fig.9 Vertical deflection influence line at 1/4 equinox of left main span

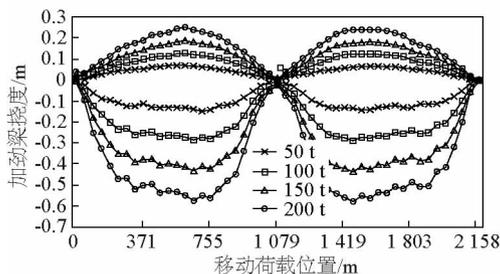


图10 加劲梁竖向挠度影响线峰值包络线

Fig.10 Peak value envelope of stiff girder vertical deflection influence line

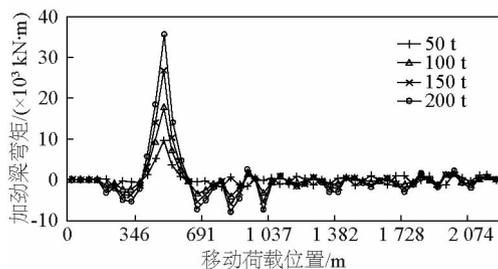


图11 左主跨1/4分点加劲梁弯矩影响线

Fig.11 Stiff girder bending moment influence line at 1/4 equinox of left main span

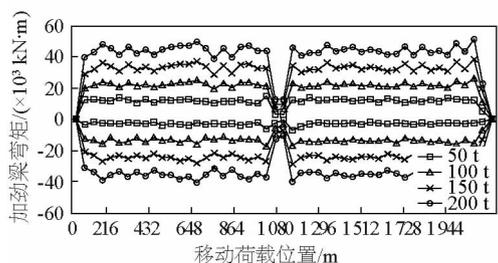


图12 加劲梁弯矩峰值包络线

Fig.12 Peak value envelope of stiff girder bending moment

4 结语

依据 ANSYS 有限元程序,进行了交通荷载作用下的泰州大桥结构动力响应研究,分析了不同移动速度以及不同移动荷载大小对于三塔两跨悬索桥结构动力响应的影响,并得到以下结论:

1) 主梁振动大桥最先出现的主振型,一阶竖弯振动基频约为0.08 Hz,远低于载重汽车 2~5 Hz 的固有频率。因此,交通荷载作用下,大跨三塔两跨悬索桥不会出现临界速度下共振。

2) 简单的移动荷载作用下,三塔两跨连续支承悬索桥的内力、位移与同等静力荷载作用效果比较接近。结构动力响应最敏感的部位为 $L/8 \sim L/4$ (L 为跨径) 区段。

3) 移动荷载的质量越大、速度越大,结构的内力、位移响应就越大,并与车重呈近似正比例关系。结构内力、位移的荷载放大系数不随移动荷载质量的大小而改变。

参考文献

- [1] 杨进,徐恭义,韩大章,等. 泰州长江公路大桥三塔两跨悬索桥总体设计与结构选型[J]. 桥梁建设,2008(1):37-40.
- [2] 沈世钊,徐崇宝,赵臣,等. 悬索结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] Chan Tommy H T, Guo Li, Li Zhaoxia. Finite element modeling for fatigue stress analysis of large suspension bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003,261:443-464.
- [4] ANSYS 公司. Release 10.0 Documentation for ANSYS[DB].
- [5] 杨佑发,白文轩,魏建东. 采用 Ernst 公式计算斜拉桥斜拉索振动特性的精度分析[J]. 世界地震工程,2008,6(2):52-55.
- [6] Miao Changqing, Chen Liang, Feng Zhaoxiang. Study on effects of environmental temperature on dynamic characteristics of Taizhou Yangtze River Bridge[J]. Engineering Sciences, 2011,9(2):78-82.
- [7] 邓育林,彭天波,李建中,等. 大跨度三塔悬索桥动力特性及抗震性能研究[J]. 振动与冲击,2008,27(9):105-110.
- [8] 刘斌. 三塔悬索桥振动特性的研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [9] 毛清华. 公路桥梁的车辆振动研究[D]. 上海:同济大学,1987.

The study of forced vibration for three-tower suspension bridge under moving loads

Feng Zhaoxiang¹, Chen Liang², Miao Changqing²

(1. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China; 2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[**Abstract**] Taking Taizhou Bridge for example, dynamic characteristics of the finite element model are analyzed and then the effects of different moving speeds and loads on dynamic response of three-tower two-span suspension bridge are studied. The result demonstrates that vertical bending of natural frequency is approximately 0.08 Hz, which is far below natural frequency loading truck, and will not form resonance condition. The response of force and displacement of three-tower two-span continuous suspension bridge under simply moving loads and equivalent static loads are the same. The structural will be greater when moving loads quantity and speed become greater and they have similar positive relationship. However, the load amplification factor of structural force and displacement does not vary with the quantity change of moving loads.

[**Key words**] dynamic characteristics; forced vibration; response; load amplification factor

(上接 65 页)

Research on the depth effect of caisson foundation south anchorage of Taizhou Bridge

Pan Hui, Shao Guojian, Hu Feng

(Department of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

[**Abstract**] The foundation of the gravity anchorage is usually simplified as shallow foundation, which is dis-economy when the depth effect is neglected. Because the embedded depth of caisson foundation south anchorage of Taizhou Bridge is 42 m, FEM(finite element method) is utilized to research the depth effect of the caisson foundation in the stability computing. It is clear that the depth effect improves the bearing capacity of anchorage foundation dramatically by comparing the variation of the displacement and the rotation angle of the anchorage foundation in the periods of construction and operation.

[**Key words**] gravity anchorage; caisson foundation; depth effect; FEM