

悬索管道桥施工阶段人致振动分析*

郑家杭¹, 张怀杰², 殷新锋¹, 谭本坤¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中石化中原建设工程有限公司, 河南 濮阳 457001)

摘要: 以某大跨径悬索管道桥施工阶段为工程背景, 运用 ANSYS 分析桥梁结构在不同施工阶段的模态, 通过单自由度法计算典型施工阶段桥梁振动的最大振动响应及行人舒适性, 并采用强迫振动理论计算低密度人群过桥的响应时程与最大动力响应, 对施工过程中桥梁行走舒适度进行评价。

关键词: 桥梁; 悬索管道桥; 人致振动; 施工阶段; 时程分析; 单自由度法; 舒适度

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0097-04

随着经济的蓬勃发展, 石油、天然气管道悬索桥在西部峡谷区域大面积建设并投入使用。管道悬索桥具有跨越能力大、施工周期短等优点, 但相比同类型大跨径人行悬索桥, 悬索管道桥自重更轻, 结构刚度更小, 受到动力荷载作用时动力反应更强烈。施工阶段桥梁处于吊索悬臂阶段, 同时会有大量施工人员在桥面上进行施工作业, 为保证施工安全, 需对施工阶段悬索管道桥进行人致振动分析。

1 人致振动计算理论

1.1 人致振动荷载模型

人行走时重心会发生变化, 同时两下肢会交替运动, 造成结构表面受到随时间变化的周期性竖向动力荷载和水平侧向动力荷载。行人的重心每两步左右摆动一次, 故水平侧向力的频率为竖向力的一半。行人荷载的步频、步长均在很窄的范围内随机分布(竖向一阶谐波步频为 1.7~2.1 Hz, 侧向一阶谐波步频为 0.7~1 Hz), 称之为“窄带随机过程”。当桥上行人的步频与桥梁的某阶自振频率接近时, 会造成桥梁与人之间的共振, 进而产生大幅度振动。

脚步力荷载模型可采用傅立叶级数来表达:

$$F_p(t) = W + W \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin(2\pi i f_p t - \varphi_i) \quad (1)$$

式中: $F_p(t)$ 为人群时变作用力; W 为平均行人重力; α_i 为第 i 阶简谐动荷载系数; f_p 为行人的步频; t 为行走时间; φ_i 为第 i 阶动荷载的初相位。

1.2 单自由度法计算理论

一般结构动力特性可通过模态分析来估计, 在

结构固有频率范围内, 结构的任意振动可由几个不同的谐波振动的线性组合来描述。因此, 结构可转换为几个不同等效质量的振动系统, 每个系统都为单自由度。每个等效单自由度系统都有一个固有频率和质量, 分别等于结构的每个固有频率和其对应的模态质量(见图 1)。



图 1 结构等效单自由度振动系统示意图

$$a_{\max} = \frac{P_s^*}{M_s^*} \cdot \frac{1}{2\xi} \quad (2)$$

式中: a_{\max} 为单自由度结构振动加速度最大值; P_s^* 为第 5 阶模态的广义模态力; M_s^* 为第 5 阶模态的广义模态质量; ξ 为结构阻尼比。

2 实例分析

2.1 工程背景

重庆某悬索管道桥为地锚式悬索桥, 缆索跨径为 (57.7+355+55.1) m, 主梁为钢桁梁, 桥塔采用四柱式空间钢管桁架结构, 高 39.054 m。采用单层型钢组合桥面, 宽 3 m, 两侧分别设置 0.6 m 宽检修道。悬索及风拉索锚固于桥面吊架上, 每隔 5 m 设置一个锚固点(见图 2)。主缆主跨跨度为 355 m, 矢跨比为 1/10; 主缆边跨跨度, 西岸为 57.7 m, 东岸为 55.1 m; 两根主缆的中心间距为 3 m。在不考虑风缆及风缆索夹等自重的情况下, 风缆在一个与水平面约呈 24° 角的斜面上, 风缆在其自身面内的矢跨

* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ40313)

比为 1/16。

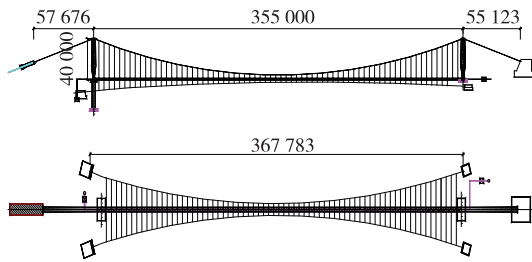


图2 某悬索管道桥的整体布置(单位:mm)

2.2 参数计算

(1) 广义模态力 P_s^* 。设第 S 阶模态的振型函数为 $\varphi(x)$, 桥宽为 B (见图 3), 等效加载力 $p(t)$ 的加载方向始终与 $\varphi(x)$ 一致, 则第 S 阶模态的等效模态力为:

$$P_s^* = \int_0^L p(t) \cdot |\varphi(x)| dx = p \cdot B \cdot \psi \cdot \int_0^L |\varphi(x)| dx \quad (3)$$

式中: L 为桥长。

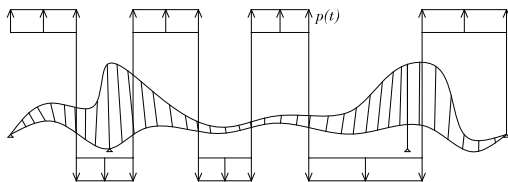


图3 等效人流荷载加载示意图

(2) 广义模态质量。第 S 阶模态的广义模态质量为:

$$M_s^* = \int m(s) \varphi^2(s) ds \quad (4)$$

式中: $m(s)$ 为单位长度质量。

(3) 等效人流荷载模型。采用的荷载模型为均匀分布的简谐荷载:

$$p(t) = p \cos(2\pi f_s t) \times n' \times \psi \quad (5)$$

式中: f_s 为步频; p 为单个行人的荷载幅值; n' 为等效人流密度; ψ 为折减系数。

2.3 建模

利用 ANSYS 有限元软件建立实桥模型, 加劲梁采用 Beam 189 空间梁单元模拟, 主缆、吊杆、风拉索和风缆采用空间杆单元 Link10 模拟, 主塔和管道采用 Pipe16 弹性直管单元模拟(见图 4)。该桥结构主体为钢结构, 阻尼比取 0.4%, 行人行走速度设为 1.5 m/s。工况背景为施工阶段, 人数根据现场统计, 按照临界人数 15 人进行计算, 质量按照 80 kg/人计算。

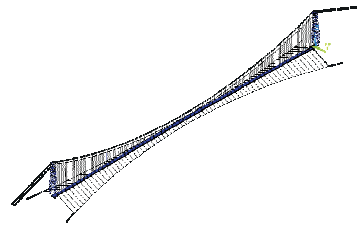


图4 某悬索管道桥有限元模型

2.4 计算工况

在原施工方案中, 加劲梁由边跨向跨中对称吊装施工, 受场地的限制, 将吊装方案改为非对称施工, 将上部结构施工简化成 7 种施工工况(见表 1)。

表1 施工流程

工况号	现场施工流程
1	安装索塔, 架设主缆
2	由西岸至东岸吊梁至 1/4 跨位置
3	由西岸至东岸吊梁至 1/2 跨位置
4	由东岸至西岸吊梁至 3/4 跨位置
5	完成加劲梁吊装并固结
6	安装风缆及风拉索
7	管道安装

选取工况 2、3、5、6 进行人行致振动分析, 评价其舒适度。

3 单自由度法计算分析

以行人侧向一阶步频为 0.5~1.2 Hz, 竖向一阶步频为 1.25~2.3 Hz, 对该桥结构不同计算工况进行模态分析, 选取满足行人步频范围的模态通过单自由度法对最大加速度进行计算分析。

通过 ANSYS 编程计算广义模态质量 M_s^* 及振型函数 $\varphi(x)$, 将计算结果代入式(2)~(5), 求出不同工况下最大加速度, 计算结果见图 5、图 6。图 7 为工况 7 下第 5 阶正对称竖弯振型。

由图 5~7 可知: 1) 最大侧向加速度发生在悬索

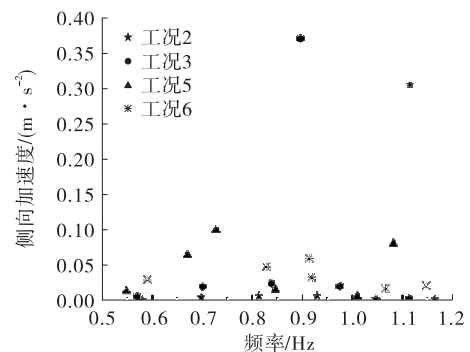


图5 最大侧向加速度响应

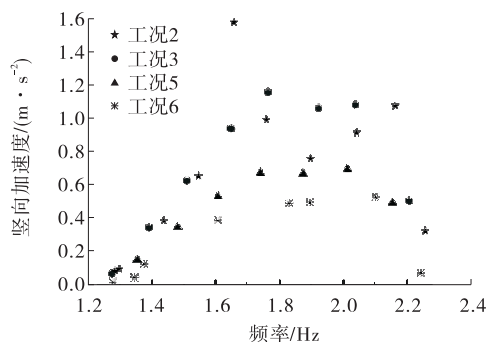


图6 最大竖向加速度响应

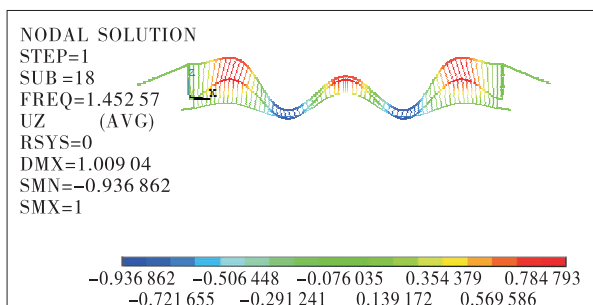


图7 工况7下第5阶正对称竖弯振型(单位:s)

桥施工最大悬臂阶段(工况3),为 0.37 m/s^2 ,频率为 0.896 Hz ;最大竖向加速度发生在吊梁至 $1/4$ 阶段阶段(工况2),为 1.58 m/s^2 ,频率为 1.657 Hz 。2) 随着节段梁吊装及风缆安装的完成,结构整体刚度增强,在不同工况下最大侧向加速度明显降低,工况5比工况2、3分别降低 67.3% 、 73.0% ,风缆安装完成后(工况6)比工况5降低 40.0% 。3) 不同工况下最大竖向加速度也明显降低,工况5比工况2、3分别降低 56.3% 、 40.5% ,工况6比工况5降低 23.2% 。

4 全桥有限元模拟时程分析

考虑桥面15个人同时过桥,频率为 1.82 Hz ,根据 Matsumoto Y.等提出的计算理论,按低密度人群自由行走进行计算, n 个幅值相等但相位随机分布的输入所产生的线性结构动力响应正好是单个输入响应的 \sqrt{n} 倍。考虑一阶谐波的情况下,单个人的过桥荷载模型如下:

$$F_v(t) = a_v G \sin(2\pi f_p t + \varphi) \delta(x - vt) \quad (6)$$

$$F_l(t) = a_l G \sin(2\pi f_p t + \varphi) \delta(x - vt) \quad (7)$$

式中: $F_v(t)$ 、 $F_l(t)$ 分别为竖向和横向人群时变作用力; a_v 、 a_l 分别为结构竖向振动和横向加速度; G 为结构自重; f_p 为行人的步频; t 为时间; φ 为结构振型函数; x 为行人位置; v 为行人速度。

按照15个人进行移动荷载过桥计算,选取主跨跨中位置进行时程分析。

4.1 桥梁振动响应分析

图8为侧向人致振动加速度与位移时程,图9为竖向人致振动加速度与位移时程。

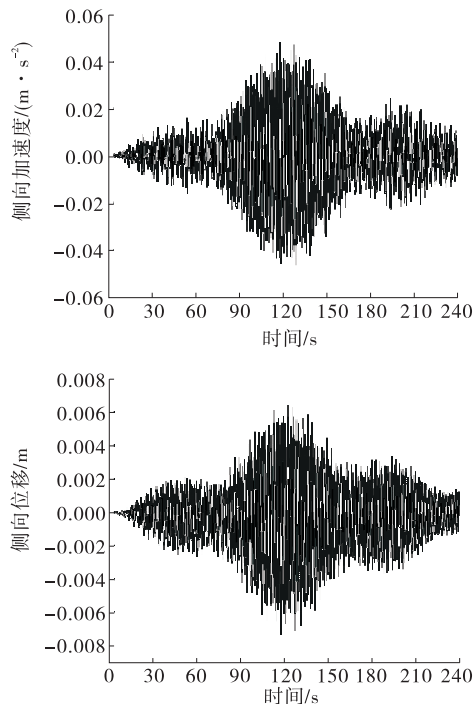


图8 侧向人致振动加速度与位移时程

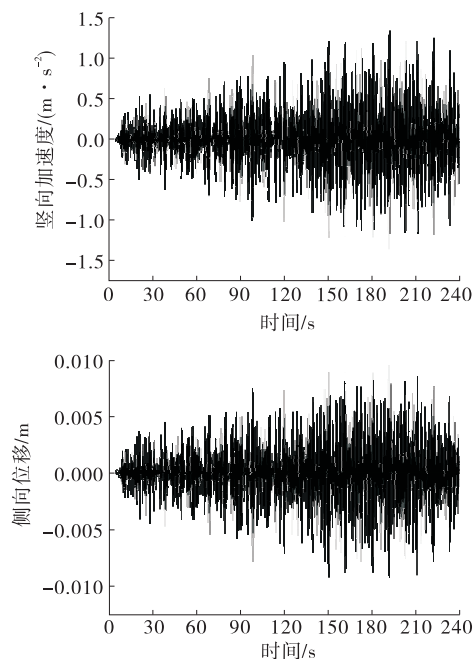


图9 竖向人致振动加速度与位移时程

由图8可知:15个人同步过桥时,主跨跨中位置最大侧向位移为 7 mm ,产生的最大加速度为

0.048 6 m/s²。

由图9可知:15个人同步过桥时,主桥跨中位置最大竖向位移为9.56 mm,产生的最大加速度为1.363 m/s²。

4.2 行人舒适度分析

行人舒适度采用德国人行桥设计指南(EN03, 2007)给出的舒适度级别(见表2)进行评价。

表2 行人舒适度级别 m/s²

舒适级别	舒适度	竖向 a_{limit}	侧向 a_{limit}
CL1	最好	<0.50	<0.10
CL2	中等	0.50~1.00	0.10~0.30
CL3	最小	1.00~2.50	0.30~0.80
CL4	不能接受	>2.50	>0.80

(1) 基于结构等效单自由度法计算该桥不同施工阶段,人致振动竖向加速度产生的最大侧向加速度发生在吊梁至跨中位置处,为0.37 m/s²,属于舒适级别CL3;产生的最大竖向加速度发生在吊梁至1/4节段处,为1.58 m/s²,属于舒适级别CL3。

(2) 风缆的安装对结构整体刚度提升明显,产生的侧向及竖向振动加速度明显降低,最大值分别为0.06、0.53 m/s²,对应舒适级别为CL1和CL2。

(3) 根据全桥结构有限元时程分析结果,最大侧向加速度为0.048 6 m/s²,舒适级别为CL1;最大竖向加速度为1.363 m/s²,舒适级别为CL3。

(4) 有限元模拟时程分析计算结果比单自由度法计算结果大,主要原因是时程分析时将15人考虑为同步频相位及幅值的简易荷载过桥模型。

5 结论

以15人为桥面施工临界人数进行计算,通过单自由度法、有限元模拟时程分析进行计算并对行人舒适度进行评价,结论如下:

(1) 桥梁在施工阶段的竖向振动比横向振动更敏感,工况5时跨中最大竖向位移比最大侧向位移高42.9%,最大竖向加速度比最大侧向加速度高632%;不同工况下最大竖向加速度比最大侧向加速度平均高500%;桥梁安装风缆后,桥面最大竖向加速度降低23.2%,桥面最大侧向加速度降低40%,风缆的安装对桥面侧向刚度的提升更大。

(2) 桥梁处于悬臂阶段(工况2、3)时,人致振动产生的最大竖向加速度平均为1.37 m/s²,最大侧向加速度平均为0.338 m/s²,对应舒适级别均为CL3,人在桥面进行施工作业会产生严重的不舒适感。桥

梁合龙并加装风缆后(工况5、6),人致振动产生的最大竖向加速度平均为0.61 m/s²,最大侧向加速度平均为0.08 m/s²,对应舒适级别分别为CL2、CL1,人在桥面进行施工作业时能感受到竖向振动,而横向振动已不会对人体产生不舒适感。

(3) 文中未考虑风致振动,而实际施工情况更复杂,为保证施工安全,当桥面振动舒适度达到CL3级别时,可考虑减少桥面施工人数或增设临时桥面减振装置。

参考文献:

- [1] 陈隽.人致荷载研究综述[J].振动与冲击,2017,36(23):1-9.
- [2] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [3] 袁旭斌.人行桥人致振动特性研究[D].上海:同济大学,2006.
- [4] 陈政清,刘光栋.人行桥的人致振动理论与动力设计[J].工程力学,2009,26(增刊2):148-159.
- [5] 杨赐.风与人群荷载共同作用下人行悬索桥的振动响应[D].西安:长安大学,2018.
- [6] MATSUMOTO Y, NISHIKA T, SHIOJIRI H, et al. Dynamic design of footbridge[C]//IABSE Proceedings,1978:1-15.
- [7] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 王新敏.ANSYS结构分析单元与应用[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [9] 法永生,李东,孙翠华.人行桥随机人行荷载下的振动分析及其舒适度评价的新方法[J].振动与冲击,2008,27(1):119-123.
- [10] 宋一凡.公路桥梁动力学[M].2版.北京:人民交通出版社,2000.
- [11] 李红利.基于响应谱方法的人行桥人致振动响应的研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [12] 刘隆.人群与梁的竖向相互作用及人行桥侧向振动机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [13] 张景,王俊峰,夏桂云.人群激励下钢桁架人行桥动力分析[J].公路与汽运,2019(2):106-109+160.
- [14] 蔡辉,何卫,陈琳琳,等.人行桥动力特性测试及振动舒适度分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(2):362-365+368.
- [15] 刘寅.人行天桥振动舒适度评价研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.

收稿日期:2020-01-06