

文章编号:1673-2049(2018)01-0086-07

垂直提升开启式拱桥动力特性分析

孙昊, 庞浩然, 张超, 郭小权

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:首先介绍了垂直提升开启式拱桥的基本组成以及开启与闭合过程的实现,然后运用有限元软件 MIDAS/Civil 对一座垂直提升开启式钢管混凝土人行拱桥进行了动力特性的数值分析,研究了桥梁闭合状态和开启状态下的自振频率和振型,分析了拱肋刚度和横撑数量对该类型桥梁自振特性的影响。结果表明:桥梁开启前后的振动频率在第5阶时差别稍大,其他各阶自振频率几乎相同,振型也基本相同;开启后开启段主梁的纵向和竖向振幅较大;增大拱肋的刚度,结构自振频率增大,有利于提高拱桥的整体稳定性;横撑数量的多少对拱肋的耦合振动影响最大;所得结论可以为同类型桥梁的设计和抗震分析提供参考。

关键词:拱桥;垂直提升开启桥;开合过程;动力特性;拱肋刚度;横撑

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

Dynamic Characteristic Analysis of Vertical Lift Bascule Arch Bridge

SUN Hao, PANG Hao-ran, ZHANG Chao, GUO Xiao-quan

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Firstly, the basic composition of the vertical lift bascule arch bridge and the realization of the opening and closing process were introduced. Then, using the finite element software MIDAS/Civil, the numerical simulation analysis was performed on a vertical lift bascule concrete-filled steel tubular pedestrian arch bridge to obtain dynamic characteristics. The vibration frequencies and vibration mode descriptions of the bridge in closed state and open state were studied, and the influence factors such as arch rib stiffness and the number of lateral bracing on the vibration characteristics were analyzed. The results show that the fifth order vibration frequency has quite difference between closed state and open state of the bridge, other vibration frequencies and vibration modes are almost the same. The longitudinal and vertical vibration amplitudes of the open section are notable when the bridge is in the open state. The vibration frequency and stability can be enhanced by increasing the arch rib stiffness. The number of lateral bracing has great impact on the coupled oscillation of arch rib. The research results can provide some references for the design and seismic analysis of the similar bridges.

Key words: arch bridge; vertical lift bascule bridge; opening and closing process; dynamic characteristic; arch rib stiffness; lateral bracing

0 引言

开启桥是一种兼顾水路和陆路交通需要,桥梁

上部结构能够移动或者转动,使船舶能够顺利通过的桥梁。当陆路运输不太繁忙,河流上有船舶航行而固定式桥梁不能建造在通航净空以上时,就需要

收稿日期:2017-05-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51408040)

作者简介:孙昊(1979-),男,河南新野人,讲师,工学博士,E-mail:sunhao2006@foxmail.com。

建造开启桥,从而解决水陆交通问题。当船舶需要通过时,陆上交通中断,开启桥开启;船舶通过后,开启桥闭合,陆上交通恢复。目前,开启桥的开启方式包括平转式、立转式、垂直提升式等方式^[1-4]。平转式开启桥在开启状态下,前后 2 个开启段分别正对着船只的通行方向,通行宽度相对较小且撞击风险较大,桥身较大的质量对位于桥墩中的转动开启系统也有较高要求;立转式开启桥的开启段倾斜或者垂直悬吊在通航船只的侧上方,给船只带来通行障碍并且安全隐患较大,开启段受力复杂多变,对建筑材料的要求也非常高,成本较大;垂直提升式开启桥结构受力合理,安全度高,开启平稳可靠,操作简单,所以被广泛使用^[5]。现有垂直提升式开启桥绝大多数是垂直提升开启式梁桥,为了实现开启,需要额外建造高大的桥塔,不仅大大增加了建设成本,而且也在一定程度上破坏了整个桥梁建筑的美观。

本文提出了一种利用钢管混凝土拱桥自身强大的拱肋代替高大的桥塔,实现开启段垂直升降的一种新型垂直提升式开启桥。该新型开启桥不需要单独建造高大的桥塔,降低了建设成本,且不破坏桥梁建筑的美观。

垂直提升开启式拱桥的主梁在开启段与固定段之间是不连续的,结构在开启与闭合的过程中会因刚度不足易在外激励下产生振动问题,动力特性问题突出。桥梁结构的自振特性是进行结构动力分析和抗震设计的重要依据,也是使用阶段判别桥梁稳定性与安全性的基本依据^[6],因此对于这种新桥型的动力特性研究很有必要。

本文首先介绍垂直提升开启式拱桥的组成及开合过程,然后以一座垂直提升开启式钢管混凝土人行拱桥为背景,运用有限元分析软件 MIDAS/Civil 建立该桥的三维有限元计算模型,对其进行了自振特性分析,根据拱桥中拱肋刚度、拱肋间横撑数量等参数对该桥动力特性的影响进行了研究。最后,探讨了垂直提升开启式拱桥自振特性及其参数影响的一般规律,以期为同类型桥梁的设计和研究工作提供参考。

1 垂直提升开启式拱桥组成及开合过程的实现

传统的垂直提升开启式梁桥是在开启段两端建造高大的桥塔,依靠桥塔里边的大型机电设备进行驱动,从而达到升降的目的。垂直提升开启式拱桥不需要额外建造高大的桥塔,依靠自身强大的拱肋

支撑,利用主梁开启段中的机电设备即可实现开启与闭合。中承式拱桥的拱肋产生较大的水平推力,一般需要设置系杆或者需要良好的地基和较大的下部结构工程,由于垂直提升开启式拱桥主梁在跨中断开,无法设置系杆,所以必须在地基基础良好的地区采用或者建造强大的基础结构来抵抗拱肋的水平推力。垂直提升开启式拱桥的组成见图 1,开启段和固定段牛腿示意如图 2 所示。

采用计算机控制技术对开启桥提升机构进行集中控制,提升过程全自动化管理。变频调速系统建立双闭环自动控制回路,对采用常规交流异步电机拖动的各组独立卷扬机设备实现运行、变速过程平稳和各吊点精确同步^[7]。

桥梁开启前,由控制系统控制配重小车向桥梁跨中行驶,配重小车就位后,由控制系统控制卷扬机开始工作,当开启孔主梁提升到预定高度时,由控制系统控制卷扬机停止工作,定滑轮锁死,完成桥梁开启及锁定;桥梁闭合前,定滑轮解锁,由控制系统控制卷扬机反向旋转,开启孔主梁开始下降,当开启孔主梁就位后,由控制系统控制卷扬机停止工作,同时控制系统控制配重小车返回到指定位置,完成桥梁的闭合。

2 动力特性分析

2.1 桥梁概况

某市政人行桥平面布置与河道基本正交,其桥型为 9.5 m+81 m+9.5 m 的飞燕式垂直提升开启式钢管混凝土拱桥,开启段主梁由 5 对钢丝绳吊杆提升。主桥长 100 m,开启段主梁长 20 m;开启前桥下通航净高为 8 m,开启后垂直提升高度 7 m,通航净高为 15 m,可满足小型游船通行;全桥采用柔性吊杆,主梁固定段与开启段连接处采用双吊杆,间距 0.5 m;拱轴线为抛物线,矢跨比为 1:5.5,拱肋位于竖直平面内,是直径为 0.6 m 的钢管混凝土构件。全桥共设 5 道一字型横撑,横撑为直径 0.4 m 的空钢管。主梁采用钢箱梁截面,宽 4.6 m,高 0.5 m,桥面净宽 3.9 m,桥面铺木板条。开启段主梁两端与固定端主梁之间留 10 cm 缝隙,方便桥梁开启和闭合。全桥提升系统采用 10 台 JM0.5 型卷扬机,额定牵引力为 5 kN,每台卷扬机重量为 1.8 kN,分别安装在开启段主梁的 10 根钢丝绳下端。全桥采用 2 台配重小车,每台重量为 23 kN,桥梁处于闭合状态时,配重小车停放在 2 个拱脚正上方的主梁内,桥梁开启后,配重小车停放于固定段主梁靠近跨

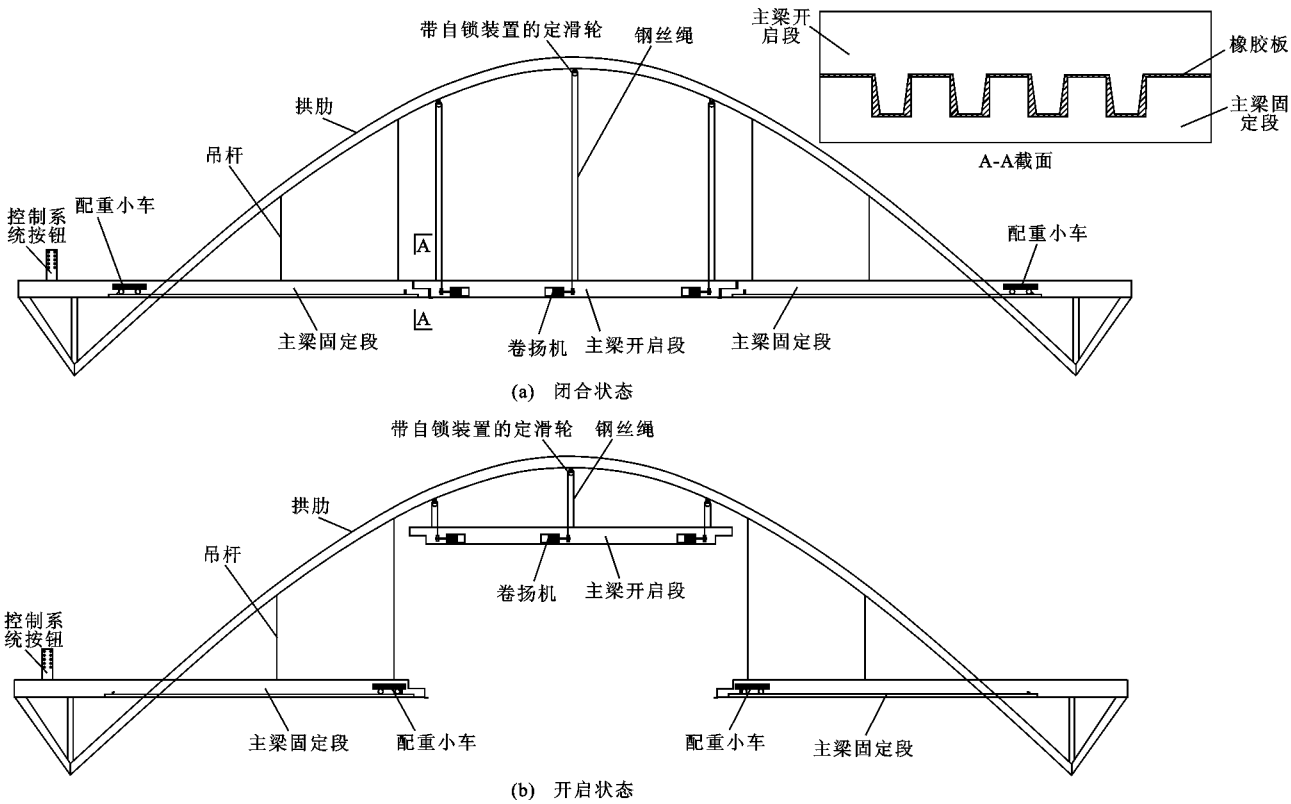


图 1 垂直提升开启式拱桥组成

Fig. 1 Composition of Vertical Lift Bascule Arch Bridge

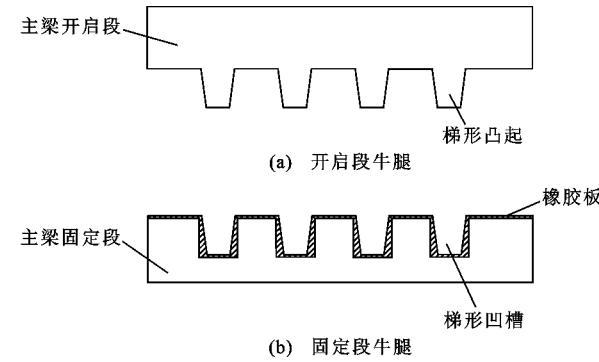


图 2 开启段和固定段牛腿示意

Fig. 2 Sketch Map of Open Section and Fixed Section Corbel

中位置的边吊杆正下方主梁内。人群设计荷载为 3.5 kPa。闭合时和开启后的总体布置如图 3 所示。

2.2 计算模型

本文采用有限元软件 MIDAS/Civil 建立该垂直提升开启式人行拱桥模型^[8]。主梁、横撑、立柱采用空间梁单元模拟;拱肋在浇筑混凝土之前为空钢管截面,浇筑后为组合截面,采用空间梁单元模拟;吊杆采用只受拉桁架单元模拟,开启段主梁吊杆在闭合状态时不张拉,其重量完全由固定段主梁承受,开启后在开启段主梁自重作用下吊杆处于拉紧状

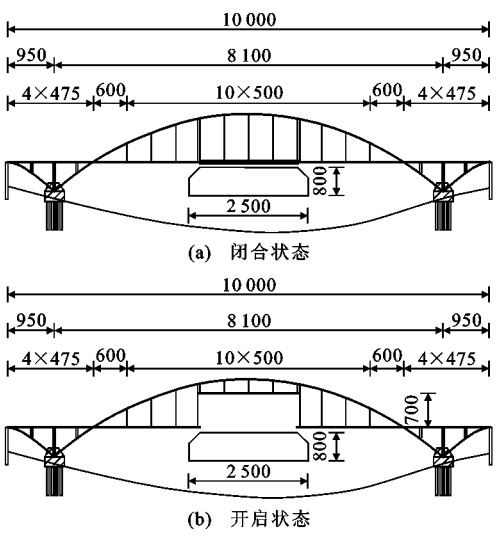


图 3 某人行桥立面图(单位:cm)

Fig. 3 Elevation Drawings of Pedestrian Bridge (Unit:cm)

态。边界条件处理:拱脚处采用刚接;拱肋和主梁在主桥两端固接,两者可一起沿桥梁纵向滑动;未开启时,开启段主梁与固定段主梁采用释放梁端约束(固定段主梁可转动和纵向滑动);开启后,开启段不施加约束。钢材采用 Q345 钢,混凝土为 C50,吊杆采用抗拉强度标准值为 1 860 MPa 的钢绞线。考虑配重小车和卷扬机重量对结构的影响,其重量采用作

用于节点上的集中力模拟,模型在分析过程中将荷载转化为质量。全桥共划分 186 个单元。全桥闭合状态和开启状态计算简图如图 4 所示,MIDAS/Civil 模型如图 5 所示。

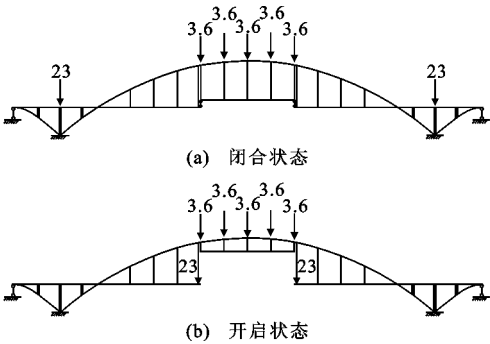


图 4 某人行桥计算简图(单位:kN)
Fig. 4 Calculation Diagram of Pedestrian Bridge (Unit:kN)

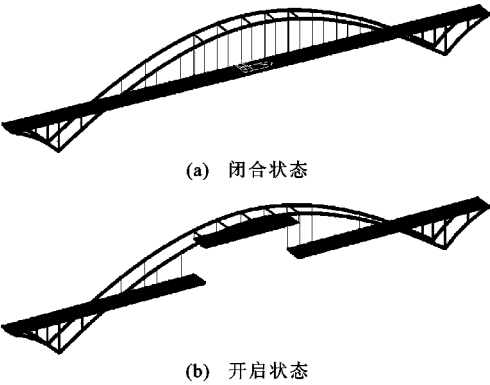


图 5 某人行桥有限元模型
Fig. 5 Finite Element Model of Pedestrian Bridge

2.3 自振频率和振型分析

本文采用子空间迭代法进行该桥的模式分析,闭合时和开启后的自振频率对比如图 6 所示。限于文章篇幅有限,仅列出前 8 阶自振特性(自振频率和振型),分别见表 1,2。桥梁闭合时和开启后典型的开启段主梁纵向振动、拱肋竖弯振动、拱肋侧弯振动和全桥耦合振动见图 7。

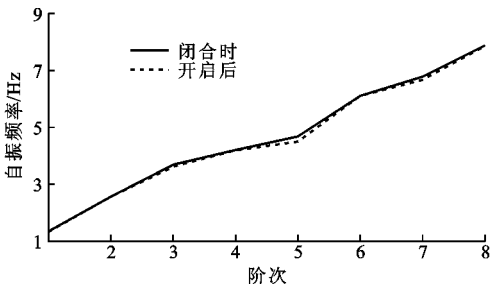


图 6 闭合时和开启后自振频率对比
Fig. 6 Comparison of Vibration Frequencies in Closed and Open States

表 1 闭合时前 8 阶自振频率和振型特征
Tab.1 The First Eight Vibration Frequencies and Vibration Mode Characteristics in Closed State

阶次	自振频率/Hz	振型描述
1	1.346	开启段主梁纵向振动,拱肋面内 1 阶反对称竖弯
2	2.560	开启段主梁纵向振动,拱肋面内 1 阶对称竖弯
3	3.697	拱肋面外 1 阶反对称侧弯,桥面系扭转振动
4	4.181	开启段主梁纵向振动
5	4.659	拱肋面外 1 阶对称侧弯,桥面系扭转振动
6	6.105	拱肋面内 2 阶对称竖弯,开启段主梁纵向振动
7	6.569	拱肋反对称侧弯、反对称竖弯和桥面系扭转耦合振动
8	7.857	拱肋对称侧弯、对称竖弯和桥面系扭转耦合振动

表 2 开启后前 8 阶自振频率和振型特征
Tab.2 The First Eight Vibration Frequencies and Vibration Mode Characteristics in Open State

阶次	自振频率/Hz	振型描述
1	1.349	拱肋面内 1 阶反对称竖弯,开启段主梁纵向、竖向振动
2	2.562	开启段主梁和拱肋面内 1 阶对称竖弯
3	3.521	拱肋面外 1 阶反对称侧弯,开启段主梁和桥面系扭转振动
4	4.197	开启段主梁纵向振动
5	4.496	拱肋面外 1 阶对称侧弯,开启段主梁和桥面系扭转振动
6	6.101	拱肋面内 2 阶对称竖弯,开启段主梁纵向振动
7	6.560	拱肋反对称侧弯、反对称竖弯和桥面系扭转耦合振动
8	7.840	拱肋对称侧弯、对称竖弯和桥面系扭转耦合振动

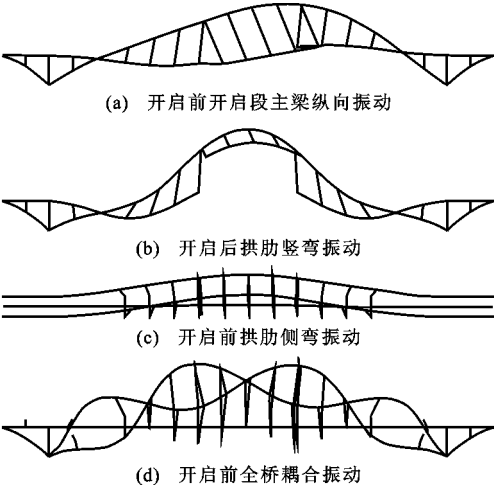


图 7 闭合时和开启后典型振型
Fig. 7 Typical Vibration Modes in Closed and Open States
由表 1,2 可以看出,该垂直提升开启式钢管混凝土拱桥的振型比较复杂,闭合时与开启后的自振频率和振型也有所不同,总体来看,具有如下基本特点:

(1)此开启桥开启前后的振动频率在第 5 阶时差别稍大,差值为 0.163 Hz。其他各阶自振频率几乎相同,结构的振型也基本相同,主要有开启段主梁纵向振动、拱肋竖弯振动、拱肋侧弯振动和全桥耦合振动 4 种。

(2)由于开启段主梁在开启后只有吊杆的悬吊作用,所以当桥梁开启后,第 1 阶振型就出现了开启段主梁的纵向、竖向振动,且振幅较大。因此,对于这类开启桥,应在外界激励较小的情况下开启。

(3)由于拱肋的面内振动先于面外振动出现,所以拱肋的竖向刚度小于其横向刚度,此钢管混凝土开启式拱桥的面内刚度小于其面外刚度,面内稳定性相对于面外稳定性更为突出。

(4)该中承式钢管混凝土开启式拱桥的自振频率较一般的钢管混凝土拱桥大,这是因为该桥桥面较窄,自重较轻,拱肋结构刚度较大,且拱肋之间还有横向支撑造成的。

3 主要结构参数的影响分析

根据拱桥理论和已有文献的研究结果^[9-19]可知,桥梁结构的动力特性取决于结构的组成体系、刚度、质量分布以及支承条件等。文献[20]研究了交叉支撑的吊杆和不同位置的损伤对中承式钢管混凝土拱桥固有振动特性的影响,认为位于跨中的吊杆损伤对竖向弯曲振动影响最大,靠近 1/4 跨和 3/4 跨的交叉支撑损伤对结构的横向振动影响最大。可见,动力特性的影响因素很多,且对于不同桥梁不同的振动形态,各因素的影响程度不同。本文针对该中承式钢管混凝土开启式人行拱桥,从拱肋的刚度和横撑的数量 2 个方面来探讨其对桥梁闭合时和开启后自振特性的影响规律。

3.1 拱肋刚度的影响

拱肋是拱桥最重要的构件,为了分析拱肋刚度对动力特性的影响,在原有有限元模型的基础上,将拱肋直径从原来的 60 cm 减小为 50 cm 和增大为 80 cm,拱肋的刚度发生变化,其闭合时和开启后自振频率所受的影响如图 8 所示。

从图 8 可以看出:桥梁闭合时与开启后,自振频率随拱肋直径变化的趋势相同,都随拱肋直径的增大而有所提高。当拱肋直径增大到 80 cm 时,自振频率显著提高。增大拱肋的刚度可提高结构自振频率,有利于提高拱桥的整体稳定性。

3.2 横撑数量的影响

为了分析横撑对该桥动力特性的影响,在原有

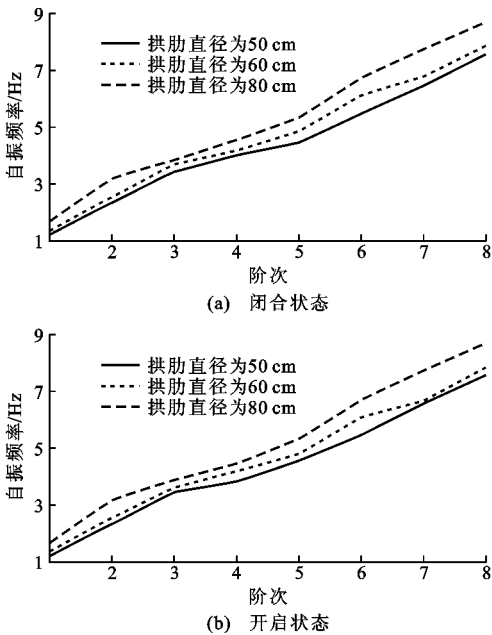


图 8 拱肋刚度对自振频率的影响
Fig. 8 Influences of Arch Rib Stiffness on Vibration Frequencies

模型的基础上分别减少 2 个横撑、增加 2 个横撑和去除所有横撑来分析其对桥梁闭合时和开启后的动力特性影响。横撑间距以及具体增加与减少的横撑位置如下(图 9):原模型有②,③,④,⑤,⑥五道横撑;在原模型的基础上减少 2 道横撑,留下②,④,⑥三道横撑;在原模型的基础上增加 2 道横撑,即有①,②,③,④,⑤,⑥,⑦七道横撑;把所有横撑都除去,即 0 个横撑。具体的影响对比如图 10 所示。

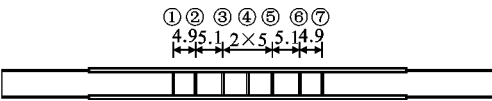


图 9 某人行桥有 7 个横撑时的平面示意图(单位:m)
Fig. 9 Plan Drawing of a Pedestrian Bridge with 7 Lateral Braces (Unit:m)

从图 10 可以看出:

(1)桥梁闭合时与开启后,自振频率随横撑数量变化的趋势相同,均随横撑数量的增多而增加,说明增加横撑能提高结构的刚度。

(2)横撑对拱肋和桥面系的侧弯振动、竖弯振动、耦合振动和开启段主梁的纵向振动都有一定程度的影响,当横撑增多时各阶自振频率都有所增加,其中第 3,5,7,8 阶影响较明显。说明横撑数量对耦合振动影响最大。

(3)当全桥不设横撑时,除了第 3 阶振动外,其他各阶自振频率值的影响都较小,说明该桥面外刚度较大。

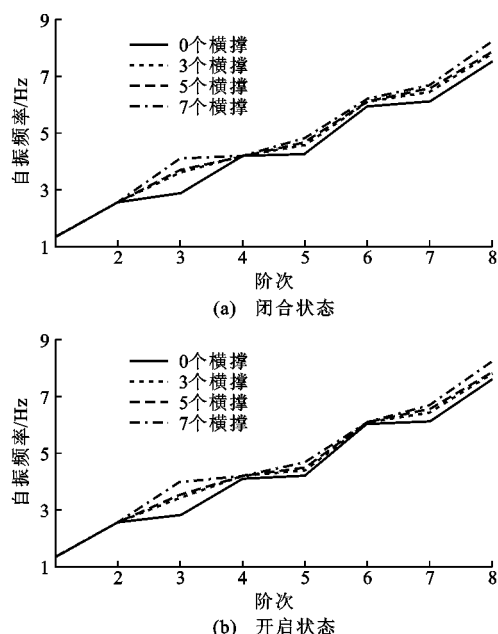


图10 横撑数量对自振频率的影响

Fig. 10 Influences of Number of Lateral Bracings on Vibration Frequencies

4 结 语

(1)垂直提升开启式拱桥是一种利用钢管混凝土拱桥自身强大的拱肋代替高大的桥塔,实现开启段垂直升降的一种新型垂直提升式开启桥,不需要单独建造桥塔,降低了建设成本,且不破坏桥梁建筑的美观。由于桥梁的主梁断开,无法设置系杆来平衡拱肋产生的水平推力,因此需要在地基基础良好的地区采用或者建造强大的基础结构抵抗拱肋的水平推力。

(2)垂直提升开启式人行拱桥开启前后的振动频率在第5阶时差别稍大,其他各阶自振频率几乎相同,结构的振型也基本相同,主要有开启段主梁纵向振动、拱肋竖弯振动、拱肋侧弯振动和全桥耦合振动4种。对于这类桥梁,应在外界激励较小的情况下开启。拱肋的竖向刚度小于其横向刚度,此钢管混凝土开启式拱桥的面内刚度小于其面外刚度,面内稳定性相对于面外稳定性更为突出。

(3)桥梁闭合时与开启后,自振频率随拱肋直径变化的趋势相同,都随拱肋直径的增大而有显著的提高。增大拱肋的刚度可提高结构自振频率,有利于提高拱桥的整体稳定性。

(4)桥梁闭合时与开启后,自振频率随横撑数量变化的趋势相同,均随横撑数量的增多而增加,说明增加横撑能提高结构的刚度。横撑数量对拱肋的耦

合振动影响最大。

参考文献:

References:

- [1] 宁贵霞,田 琪,李春梅.日本梦舞大桥的设计与施工[J].世界桥梁,2004(2):1-4.
NING Gui-xia, TIAN Qi, LI Chun-mei. Design and Construction of the Dream and Dance Bridge in Japan [J]. World Bridges, 2004(2):1-4.
- [2] 吴保平.天津84年历史变迁的见证者——解放桥[J].建筑,2010(9):76-77.
WU Bao-ping. The Witness of the 84-years History of Tianjin — The Liberation of the Bridge[J]. Construction and Architecture, 2010(9):76-77.
- [3] 王跃年,胡海波.法国鲁昂塞纳河升降开启桥[J].世界桥梁,2009(1):1-3.
WANG Yue-nian, HU Hai-bo. French Rouen Seine River Lift Bridge[J]. World Bridges, 2009(1):1-3.
- [4] 梅新咏.温州瓯南大桥开启桥方案构思[J].桥梁建设,2006(增2):90-93.
MEI Xin-yong. Conceptual Consideration of Opening Bridge of Ounan Bridge in Wenzhou[J]. Bridge Construction, 2006(S2):90-93.
- [5] 汤晓波,胡星宇,任 聪,等.基于主梁纵向平移的伸缩式开启桥设计[J].产业与科技论坛,2011,10(8):108-109.
TANG Xiao-bo, HU Xing-yu, REN Cong, et al. Design of Telescopic Open Bridge Based on Longitudinal Translation of Main Girder[J]. Industrial & Science Tribune, 2011, 10(8):108-109.
- [6] 项海帆,刘光栋.拱结构的稳定与振动[M].北京:人民交通出版社,1991.
XIANG Hai-fan, LIU Guang-dong. Arch Structure Stability and Vibration[M]. Beijing:China Communications Press, 1991.
- [7] 涂光骞.天津梅江南环岛开启桥提升控制系统[J].桥梁建设,2005(增):131-134.
TU Guang-qian. Lifting Control System of Nanhuan Island Movable Bridge over Meijiang River in Tianjin [J]. Bridge Construction, 2005(S):131-134.
- [8] 施 洲,苏威凤,郭俊丽,等.飞燕式拱桥结构静动力分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2013,32(增1):873-878.
SHI Zhou, SU Wei-feng, GUO Jun-li, et al. Static and Dynamic Analysis on Fly-swallow Type Arch Bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013, 32(S1):873-878.
- [9] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].2版.北京:人民交通

- 出版社,2007.
- CHEN Bao-chun. Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press,2007.
- [10] 陈水盛,陈宝春. 钢管混凝土拱桥动力特性分析[J]. 公路,2001(2):10-14.
- CHEN Shui-sheng, CHEN Bao-chun. Analysis of Dynamic Characteristics of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Highway,2001(2):10-14.
- [11] REN W X, ZHAO T, HARIK I E. Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge[J]. Journal of Structural Engineering,2004,130(7):1022-1031.
- [12] ZHAO J, DE WOLF J T. Sensitivity Study for Vibration Parameters Used in Damage Detection[J]. Journal of Structural Engineering,1999,125(4):410-416.
- [13] HASSIOTIS S, JEONG G D. Identification of Stiffness Reduction Using Natural Frequencies[J]. Journal of Engineering Mechanics,1995,121(10):1106-1113.
- [14] LI L Y, CHEN Z Q, GE Y J. Effects of Arch Rib Crossbars on Dynamic and Stabilization Characteristics of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: English Edition,2008,3(2):98-103.
- [15] 陈淮,张广坡,王艳,等. 中、下承式拱桥自振特性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2008,5(5):32-36.
- CHEN Huai, ZHANG Guang-po, WANG Yan, et al. Dynamic Property Analysis of Half-through and Bottom-through Arch Bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2008,5(5):32-36.
- [16] 程怀江,周安,章俊生. 中承式钢管混凝土拱桥自振特性分析[J]. 工程与建设,2007,21(5):664-666.
- CHENG Huai-jiang, ZHOU An, ZHANG Jun-sheng. Analysis on Self-vibration Characteristics of Half-through Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Engineering and Construction,2007,21(5):664-666.
- [17] 高大峰,刘伯栋,张静娟. 中承式钢筋混凝土拱桥自振特性分析[J]. 西北地震学报,2009,31(1):75-79.
- GAO Da-feng, LIU Bo-dong, ZHANG Jing-juan. Analysis on Self-vibration Characteristics of Half-through Reinforced Concrete Arch Bridge[J]. Northwestern Seismological Journal,2009,31(1):75-79.
- [18] 王颀,马青松. 结构参数对下承式钢管混凝土拱桥动力特性的影响[J]. 桥梁建设,2011(2):34-38.
- WANG Wei, MA Qing-song. Effect of Structural Parameters on Dynamic Characteristics of Through Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges[J]. Bridge Construction,2011(2):34-38.
- [19] 黄小伟,王浩,李爱群,等. 中承式异形钢管混凝土拱桥动力特性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2012,29(1):87-93.
- HUANG Xiao-wei, WANG Hao, LI Ai-qun, et al. Analysis on Dynamic Characteristics of Half-through Special-shaped CFST Arch Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2012,29(1):87-93.
- [20] NIU R M, XU H W, DENG H. Influence of the Structural Damage on Dynamic Characteristics of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[C]//ASCE. Civil Engineering and Urban Planning. Reston: ASCE, 2012:333-337.