

地震作用下高墩大跨连续刚构桥的非线性动力稳定性能研究

张倩, 莫建超, 孙建鹏

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 地震作用下高墩大跨连续刚构桥的动力稳定性能已成控制结构安全的重要因素. 本文基于 ANSYS 的动力稳定性分析方法—改进的动态特征值法, 对某一刚构桥在考虑双重非线性下的动力稳定性进行了分析; 探讨地震波特性、阻尼比、结构特性等对其动态特征值的影响. 结果表明随着地震波周期、地震波幅值、结构跨度、桥墩高度中任意一个的增大或梁端约束的减弱, 结构的动态特征值均呈现最小值减少、最大值增大的趋势; 阻尼比越大, 结构动态特征值曲线波动幅度越小.

关键词: 刚构桥; 动力稳定; 非线性; ANSYS

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0013-05

Study on nonlinear dynamic stability of continuous rigid frame bridge with high piers under seismic action

ZHANG Qian, MO Jianchao, SUN Jianpeng

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The dynamic stability of long-span continuous rigid frame bridge with high piers under seismic action has become an important factor for the safety of the structure. In this paper, based on the dynamic stability analysis method of ANSYS—the improved dynamic eigenvalue method, the dynamic stability of a rigid frame bridge under the consideration of the double nonlinearity is analysed. The influence of seismic wave characteristics, damping ratio and structural characteristics on its dynamic eigenvalue is discussed. The result shows that with the increase of any one of seismic wave cycles, seismic wave amplitudes, structure span, height of pier or the attenuation of the beam end constraint, the minimum dynamic eigenvalue of the structure is reduced while the maximum value increased. A greater damping ratio corresponds to a smaller curve fluctuation of structure's dynamic eigenvalue.

Key words: rigid frame bridge; dynamic stability; nonlinear; ANSYS

近年来,我国高墩大跨连续刚构桥的建设迅速发展,而与此同时地震也是频频发生.为了使灾害最小化^[1],除了保证地震作用下桥梁结构的强度外,对其动力稳定性研究^[2-4]不可或缺.

高墩大跨连续刚构桥由于墩高、跨度大及墩柱固结等特点,其几何非线性问题突出^[5],这使得该类结构在地震作用下产生竖向和横向的耦合效应,并由于这些内在耦合效应而附加弯曲、扭转等复杂的变形;在强烈地震作用下某些部位会率先进入弹塑性阶段,因此其材料非线性也不能忽略.

对于动力稳定问题^[6-7],国内外学者已做了一

定程度的研究. K. D. Hjelmstad 等^[8]较早阐明了结构动力失稳与静力失稳的联系和区别,并进一步提出动力失稳的成因有参数共振、累积能量的耗散、极端大变形等,这些为后续相关研究工作的展开奠定了基础. 徐艳等^[9-10]以一钢管混凝土拱桥为例,基于 Ansys 分别使用动态特征值法和动态增量法(IDA)对其第一类和第二类稳定问题进行了分析,结果表明两类失稳对应的最不利地震波输入方向不同,且两类动力失稳临界荷载相差较大. 这说明动态特征值法在第二类动力问题分析上具有局限性,需要进一步优化. 李黎等^[11]则较早将动态特征值法应用于高墩大跨连续刚构桥的

收稿日期: 2017-01-19

修改稿日期: 2018-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408453); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20136120120022); 陕西省自然科学基金研究计划基金项目(2016JQ5075)

第一作者: 张倩(1971—),女,博士,副教授,主要研究领域为道路工程. E-mail: zhzzqs@126.com

通讯作者: 莫建超(1992—),男,硕士,主要研究领域为桥梁结构设计理论. E-mail: mjcxauat@qq.com

弹性动力失稳分析,发现竖向输入是该桥在地震作用下稳定分析的最不利输入方向,且阻尼比能显著增大临界荷载值.在此基础上,张行等^[12]建立高墩大跨连续刚构桥的纤维模型,并结合动态增量法(IDA),对其进行了非线性动力稳定研究.鲁四平等^[13]首次提出了改进的动态特征值法,即考虑了结构双重非线性的动力稳定性分析方法,并应用在一箱形截面长柱的动力失稳研究上,但此方法在高墩大跨连续刚构桥上的应用,还未曾有人尝试.

因此,本文在考虑动力稳定分析中的双重非线性^[14]的基础上,应用改进的 Ansys 特征值屈曲分析方法,对一高墩大跨连续刚构桥进行动力稳定分析,研究地震波特性、阻尼、结构特性等对该类结构动力稳定性能的影响.

1 动力稳定分析方法

特征值屈曲分析过程较为简便,但是仅考虑线性行为,故所得屈曲值一般为失稳荷载上限,安全系数较低;基于动态增量法(IDA)的非线性屈曲分析^[15]由于要分析不同地震波幅值下结构各时刻各点的响应变化,工作量巨大,一般取结构几个有代表性位置的响应作为考察对象.但是实际结构和地震波复杂多变,很难取出较为准确的特征响应点.综上,可以改进现有的动态特征值法,减少或消除其缺陷,考虑双重非线性,使得屈曲荷载结果更具代表性.改进的动态特征值法具体步骤概况如下:先进行考虑结构双重非线性的时程分析,接下来进行重启动分析,获得结构 t 时刻初始应力状态后,更新结构的几何构型,即在后续屈曲分析中考虑结构初始缺陷的影响.程序框图如图 1.

2 计算模型

某三跨连续刚构桥的有限元模型如图 2 所示, x 、 y 、 z 轴分别表示桥梁纵向、竖向、横向.墩高 70 m,均采用薄壁矩形等截面($5\text{ m} \times 7\text{ m}$),壁厚 0.5 m;主梁采用 $49\text{ m} + 82\text{ m} + 49\text{ m}$ 单箱单室变截面箱梁.墩、梁均采用 beam189 单元模拟,墩底和墩梁之间均为固结,边跨梁端约束为双向(竖向、横向)简支.地震波采用 El Centro 波,时间间隔为 0.02 s,持续时间取 10 s,阻尼比为 0.05.应用控制变量法分别研究地震波特性(改变周期和幅值)、阻尼比、墩高、跨长、梁端约束强度等因素对结构屈曲特征值的影响.本文重点在于研究

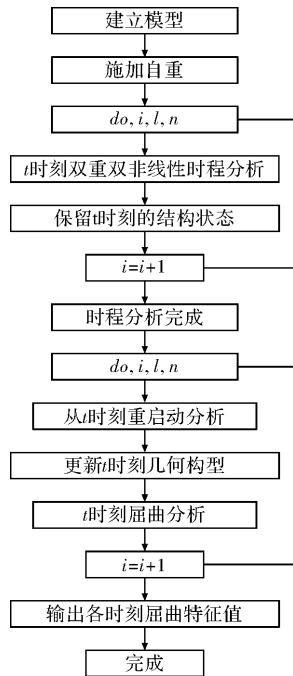


图 1 程序框图

Fig. 1 Program block diagram

各参数对结构动力稳定性能的影响趋势,故不再进一步求出屈曲临界荷载.

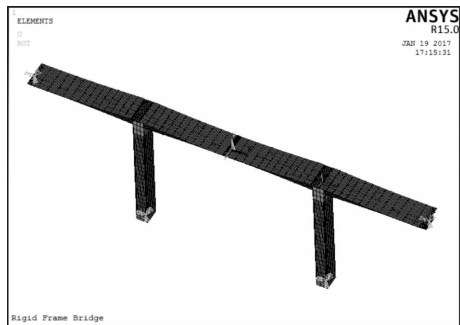


图 2 有限元模型图

Fig. 2 Finite element model

3 动态特征值法改进前后结果对比

在 ansys 时程分析中,可以考虑材料非线性,故后续的特征值屈曲分析也考虑了材料非线性的影响;在特征值屈曲分析前根据时程分析的结果更新结构的几何构型,则考虑了结构的几何非线性影响,故改进的动态特征值法能够考虑双重非线性.

为了进一步验证本文所提方法的有效性,现将动态特征值法改进前后的结果进行对比,其对比结果如图 3~5 所示.

由图 3~5 可见,在纵向和横向地震波输入情况下,考虑几何非线性后对结构的动态屈曲特征值曲线的波动幅度明显增大.图 3 纵向地震波输入时,特征值最小值由 43.5 减小到 15.6,减幅特别

大;图4竖向地震波作用下,考虑几何非线性前后特征值曲线变化并不明显,两者基本重合.推其原因在于结构在受到沿桥梁纵向和横向的地震作用时,除了发生轴向运动还有水平侧移,而在竖向地震作用时,结构主要发生沿桥墩轴向的运动,前者几何非线性效应明显大于后者.

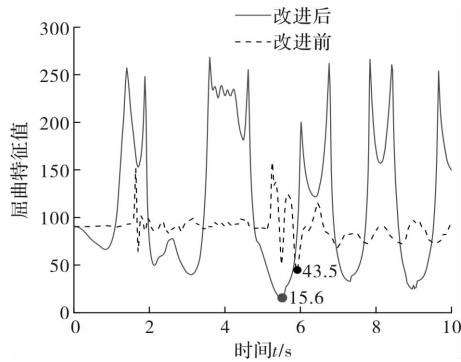


图3 沿桥纵向的地震作用

Fig. 3 Longitudinal seismic action along bridge

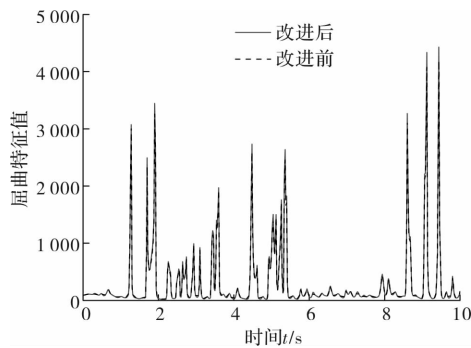


图4 沿桥竖向的地震作用

Fig. 4 Vertical seismic action along bridge

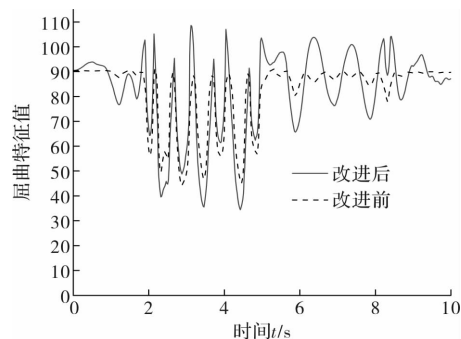


图5 沿桥横向的地震作用

Fig. 5 Transverse seismic action along bridge

综上所述,屈曲分析前是否更新结构的几何构型,对动态特征值曲线影响显著,说明用此方法考虑的几何非线性对结构动力稳定有一定影响.相比于竖向地震,水平向地震作用时此方法能对结构的屈曲分析结果产生更显著的影响,故以下的研究均建立在地震波沿桥纵向输入情况下.

4 地震波特性和对结构动力稳定性能的影响

不同地区的场地条件和地震设防烈度均不同,而场地条件直接影响传到结构的地震波的主要周期,地震烈度影响地震波的峰值加速度.故本节将探讨不同地震波周期和幅值对结构动力稳定的影响.调整 El Centro 波周期,各周期对应屈曲特征值变化曲线如图6所示.从图6可以看出,在地震动过程中,结构屈曲特征值曲线起始点值为静力屈曲特征值,之后大致在此值上下波动,且波动幅度随着地震波周期的增大而明显增大,在起始点上下的波动次数则逐渐增加.不同周期下动态特征值极值发生的时刻如表1所示.从表1可知,随着地震波周期的增长,最大屈曲特征值逐渐增大,发生时刻有一定提早;最小屈曲特征值逐渐减小,发生时刻有一定延后.放大 El Centro 波幅值到9度设防区罕遇地震加速度峰值0.40 g,得到结构的屈曲特征值曲线如图7.由图7可以看出,调幅后结构屈曲特征值最小值为3.02,相对于调幅前的15.56减少了12.54;最大特征值由调幅前的268.36增大到448.80.该结构在9度设防区地震加速度峰值作用下最小特征值为3.02,说明该桥的动力稳定性能较好.

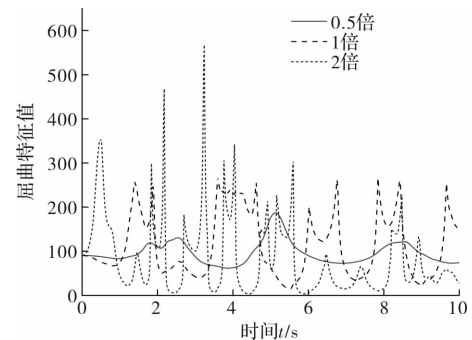


图6 不同地震波周期下的动态特征值时程曲线

Fig. 6 Dynamic eigenvalue-time curve under different seismic wave periods

表1 不同周期下动态特征值极值发生的时刻

Tab. 1 Occurrence time of extreme value of dynamic eigenvalue in different periods

周期	最大特征值	最大特征值发生时刻 t/s	最小特征值	最小特征值发生时刻 t/s
0.5 倍	186.89	5.12	61.79	3.90
1 倍	268.36	3.6	15.56	5.52
2 倍	567.58	3.24	3.53	5.92

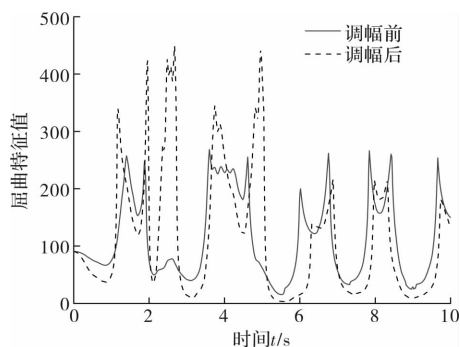


图7 不同地震波幅值下的动态特征值时程曲线

Fig. 7 Dynamic eigenvalue-time curve under different seismic wave amplitudes

通过对比分析上述各图、表可以看出,增大地震波的周期和幅值都使特征值曲线的最小值产生一定程度的减少,即整桥更容易发生动力失稳。

5 阻尼对结构动力稳定性能的影响

动力作用下,阻尼对能量有耗散作用,这使得结构的动力响应有一定程度的衰减,故阻尼也会间接影响结构的动力稳定性能。本节通过改变改变结构的阻尼比 ξ , 分别取值为 0、0.025、0.05, 并换算成 Rayleigh 阻尼输入 ANSYS 进行分析, 结果见图 8。

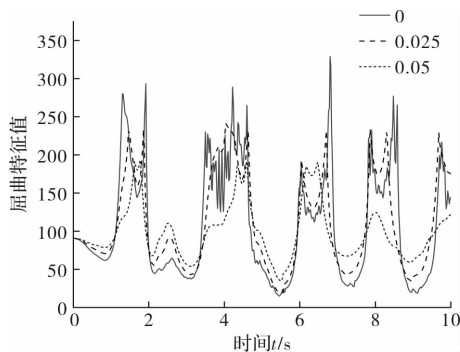


图8 不同阻尼比下的动态特征值时程曲线

Fig. 8 Dynamic eigenvalue-time curve under different damping ratios

由图 8 可以看出,随着阻尼比取值的减小,结构屈曲特征值曲线的波动幅度和波动频率都有明显的增大,屈曲特征值最大值有一定程度的增加,而屈曲特征值最小值从阻尼比为 0.05 时的 34.81 急剧减小到阻尼比为 0 时的 14.89。这说明阻尼对结构的动力失稳有显著的影响,增大结构的阻尼能明显提高结构动力稳定性。

6 结构参数对动力稳定性能的影响

分别分析了 2 倍跨径、2 倍墩高两种情况下结构的动力稳定性能,其计算结果如图 9 所示,其中

对照组表示 1 倍跨径情况。由图 9 可以看出,增大跨径和墩高都使结构的动态屈曲特征值初始值减小,这和静力屈曲特征值的变化趋势是一样的;而动力响应过程中最小屈曲特征值也有一定的下降,原结构为 15.56, 2 倍跨径时为 6.33, 两倍墩高时为 7.57, 即这两种情况下动力稳定性都有明显的下降。另外,改变梁端沿桥纵向弹性约束的强度,设 0、 1.0×10^7 、 2.5×10^7 、 5.0×10^7 (单位 N/m) 四个强度,进行动力稳定分析其计算结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,动态特征值曲线的波动幅度随着约束强度的增大明显减弱,最小屈曲特征值在四个弹性约束强度下分别为 15.56、31.96、80.46、94.69, 故增强两端的约束能够有效提高结构的动力稳定性能。

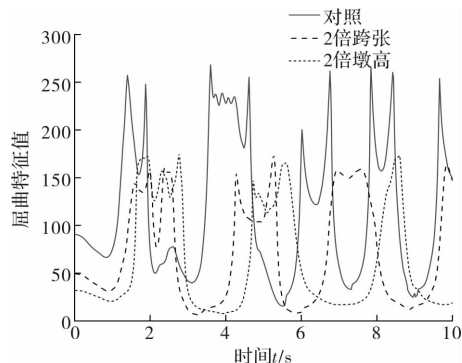


图9 不同结构参数下的动态特征值时程曲线

Fig. 9 Dynamic eigenvalue-time curve under different structural parameters

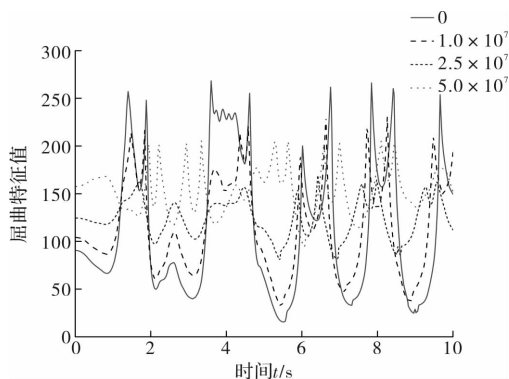


图10 不同梁端约束强度下的动态特征值时程曲线

Fig. 10 Dynamic eigenvalue-time curve under different beam end restraint strength

7 结论

本文借鉴目前两类结构动力稳定分析方法各自的优势,改进原有的基于第一类动力稳定分析的动态特征值法,利用 ANSYS 编程形成一种考虑双重非线性的分析方法,并用此方法研究地震波特性、阻尼、结构参数等因素对一高墩大跨刚构

桥动力稳定性能的影响。主要结论如下:

(1)屈曲分析前是否更新结构的几何构型,对动态特征值曲线影响显著,说明用此方法考虑的几何非线性对结构动力稳定有一定影响。

(2)地震波的周期越大,即地震作用变化越慢(相对于结构自振周期而言),结构的动力屈曲特征值最小值越小,越容易发生动力失稳。

(3)阻尼对结构的动力失稳有显著的影响,增大结构的阻尼能明显提高结构动力稳定性。

(4)跨长或墩高增大后,结构的屈曲特征值最小值都会大幅减小;加强梁端约束能明显提高结构的动力稳定性。

参考文献 References

- [1] 谷音,黄怡君,卓卫东. 高墩大跨连续刚构桥梁地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2): 91-97.
GU Yin, HUANG Yijun, ZHUO Weidong. Study on seismic vulnerability of long-span continuous rigid frame bridge with high piers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2): 91-97.
- [2] 周慧,宋君晗,罗松南. 地震表面波引起高桥墩的动力屈曲分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(10): 14-19.
ZHOU Hui, SONG Junhan, LUO Songnan. Dynamic of buckling of the high pier under the surface wave by earthquake[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2012, 39(10): 14-19.
- [3] 李杰,徐军. 结构动力稳定性判定新准则[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 965-971.
LI Jie, XU Jun. Novel criterion for identification of dynamic stability of structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(7): 965-971.
- [4] 郭伦波. 高墩大跨连续刚构桥空间稳定性及强度分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(6): 289-293.
GUO Lunbo. Spatial stability and strength analysis of long-span continuous rigid frame bridge with high piers[J]. Journal of Highway transportation technology (Application Technology), 2014(6): 289-293.
- [5] 陈彦,文华斌,占玉林. 地震作用下高墩大跨连续刚构桥几何非线性影响研究[J]. 铁道建筑, 2013(7): 15-18.
CHEN Yan, WEN Huabin, ZHAN Yulin. Study on geometric nonlinear effects of high pier and long-span continuous rigid frame bridge under earthquake[J]. Journal of Railway Engineering, 2013(7): 15-18.
- [6] SIMITSES G J. The Concept of Danamic Stability [M]. New York: Springer, 1990: 95-100.
- [7] CAPSONI A, ARDITO R, GUERRIERI A. Stability of dynamic response of suspension bridges[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 1: 1-22.
- [8] HJELMSTAD K B, WILLIAMSON E B. Dynamic stability of structural systems subjected to base excitation[J]. Journal of Engineering Structures, 1998, 20(4-6): 425-432.
- [9] 徐艳,胡世德. 钢管混凝土拱桥弹性动力稳定性能研究[J]. 地震工程与工程动, 2006, 26(4): 162-167.
XU Yan, HU Shide. Study on elastic dynamic stability of a CFST arch bridge[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 162-167.
- [10] 徐艳,胡世德. 地震作用下钢管混凝土拱桥的动力稳定性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 315-319, 340.
XU Yan, HU Shide. Dynamic stability of concrete filled steel tubular arch bridge under earthquake[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(3): 315-319, 340.
- [11] 李黎,张行,龙晓鸿,等. 地震作用下高墩大跨连续刚构桥的弹性动力稳定性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(6): 84-88.
LI Li, ZHANG Xing, LONG Xiaohong, et al. Investigation on elastic dynamic stability of long-span continuous rigid frame bridge with high-piers induced by earthquake[J]. Journal of Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(6): 84-88.
- [12] 张行. 地震作用下高墩刚构桥动力稳定性能研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.
ZHANG Xing. Research on dynamic stability of rigid frame bridge with high-piers under earthquake[D]. Wuhan, Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [13] 鲁四平. 基于 Ansys 的非线性动力稳定性分析方法研究[J]. 机械强度, 2013, 35(2): 142-147.
LU Siping. Study on method for nonlinear dynamic stability analysis based on Ansys[J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(2): 142-147.
- [14] NSPRSTEK J, FISCHER C. Dynamic stability of a vertically excited non-linear continuous system [J]. Journal of Computers and Structures, 2015, 155: 106-114.
- [15] 谷音,卓卫东. 基于 IDA 和纤维模型的高墩大跨连续刚构桥梁地震反应分析[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 235-240.
GU Yin, ZHUO Weidong. Seismic response analysis of long-span continuous rigid frame bridge with high piers based on IDA and fiber model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 235-240.

(编辑 桂智刚)