

程麦理.曲线桥梁墩高参数动力敏感性研究[J].地震工程学报,2020,42(1):15-21.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.015
CHENG Maili.Dynamic Sensitivity Analysis of Pier-height Parameters of Curved Bridges[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(1):15-21.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.015

曲线桥梁墩高参数动力敏感性研究

程麦理

(延安大学建筑工程学院,陕西 延安 716000)

摘要:为研究曲线桥梁结构桥墩高度参数对地震响应的敏感性,借助有限元分析软件 Midas Civil,通过分类处理建立边墩为变高墩和中墩为变高墩两类有限元分析模型。根据 Newmark- β 法对多自由度体系的曲线桥梁结构进行动力时程分析,结合曲线桥梁结构地震激励的输入基本方式,计算两类墩高布置形式下两跨曲线连续梁桥结构的基本周期、墩顶位移、主梁内力和桥墩墩底内力的变化规律,通过对计算结果分析探究桥墩高度参数和桥墩高度比参数对曲线桥梁结构地震响应的影响规律。研究结果表明:相同条件下,II类曲线桥梁的整体刚度小于I类曲线桥梁结构;各墩顶径向位移对桥墩高度比和墩高参数敏感性不同;中墩顶曲线主梁内力耦合机理复杂,难以用较少结构参数表征;变高墩墩底内力与曲线桥梁桥墩布置类型密切相关。研究结果可用于指导山区曲线桥梁结构的抗震分析和设计。

关键词:曲线桥梁;时程分析;墩高参数;墩高布置;动力敏感性

中图分类号:U448.2

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2020)01-0015-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.015

Dynamic Sensitivity Analysis of Pier-height Parameters of Curved Bridges

CHENG Maili

(School of Architecture and Civil Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

Abstract: To study the sensitivity of the pier-height parameters of curved bridges to the seismic response, we used Midas Civil finite-element-analysis software to establish two finite-element-analysis models for high and middle-range piers. We then used the Newmark- β method to perform a dynamic time history analysis of a curved bridge structure with a multi-degrees-of-freedom system. Combined with the basic input of the seismic excitation of a curved bridge structure, we calculated the changes in the basic period, displacement at the top of the pier, and the internal forces of the main beam and pier bottom of a two-span continuous bridge under two different pier-height arrangements. Based on our calculation results, we discuss the influences of the pier height

收稿日期:2018-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51408453,51808479);延安大学博士科研启动项目(YDBK2016-08);陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2018JQ5217);延安大学校级科研计划项目引导项目(YDY2017-11)。

第一作者简介:程麦理(1987-),男,博士,副教授,主要从事非规则桥梁结构抗震分析与理论研究。E-mail:cml3635@163.com。

and pier-height ratio on the seismic response of the curved bridge structure. The results show that under the same conditions, the overall stiffness of bridge II is less than that of bridge I, and the sensitivities of the radial displacements at the top of each pier to the pier height and pier-height ratio differ. We found the internal force of a high pier to be closely related to the type of bridge pier arrangement. These results can be used to guide the seismic analysis and design of curved bridge structures in mountainous areas.

Keywords: curved bridge; time history analysis; pier height parameter; pier height arrangement; dynamic sensitivity

0 引言

2008年汶川地震中,典型的曲线桥梁结构百花大桥发生严重倒塌灾害,蒋劲松等^[1]对该桥的倒塌原因进行了分析研究,结果表明百花大桥的倒塌失效是由于桥墩高度差异太大及圆曲线曲率半径过小而导致,该曲线桥梁桥墩高度存在严重差异^[2]。对于曲线连续梁桥,如果其某联的桥墩高度存在差异会导致曲线桥梁结构的地震响应呈现明显的空间行为^[3],因而对曲线桥梁结构的墩高参数进行地震动力响应敏感性研究具有重要意义。

王巾杰^[4]通过对两个曲线连续梁桥模型分析,研究了存在墩高差的曲线桥梁结构地震响应影响。李青宁等^[6]建立了4个不同墩高的曲线连续桥梁模型,采用非一致激励方式研究了墩高差及不同墩高对结构动力响应的影响。蒋锋杰^[7]探讨了曲线桥梁不同墩高状况下,各桥墩顶位移的变化规律。程麦理等^[8]通过进行振动台试验,研究了不同墩高的曲线桥梁在地震多点激励作用下的地震反应,分析得到曲线桥梁的动力特性及其可能的地震破坏模式。陈彦江等^[9]以墩高比为参数研究了某山区曲线桥梁结构的动力特性及地震响应规律。李援越^[10]对曲线桥梁结构的桥墩截面形式、墩高及墩梁连接方式进行参数分析,深入探究了桥墩高度变化对曲线桥梁结构动力特性及地震响应规律的影响。王艳等^[11]通过数值仿真分析,研究了桥墩高度和曲率半径对大跨刚构桥的抗震性能影响。由于上述研究中建立模型样本数量较少,并且侧重点不一,未能反映出参数墩高差及墩高对曲线桥梁结构动力响应影响的敏感性规律。李喜梅等^[11]通过对非平稳地震激励下的隔震曲线桥梁结构进行地震响应,探究了隔震曲线桥梁结构的地震响应规律。

本文根据结构动力时程分析方法,对曲线桥梁

结构进行结构动力特性及地震反应分析,通过建立多个仿真分析模型,探讨参数墩高及墩高差对该类桥梁结构动力特性及地震响应的影响规律,研究曲线桥梁结构墩高和墩高差参数对结构动力性能影响的敏感性。分析结果表明,参数墩高 L 和墩高比 λ 对曲线桥梁结构地震响应影响各异,结构动力特性对墩高布置形式较为敏感。

1 结构动力时程分析

多自由度结构体系的运动方程

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P(t) \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; \ddot{U} 、 \dot{U} 、 U 为结构节点的加速度、速度和位移向量; $P(t)$ 为结构动力输入荷载向量。

采用Newmark- β 法对多自由度体系结构进行动力时程分析,引入参数 β ,使得速度和位移可表示为:

$$u_{i+1} = u_i + \dot{u}_i \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_i \Delta t^2 + \beta \ddot{u}_{i+1} \Delta t^2 \quad (2)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{1}{2} (\ddot{u}_{i+1} + \ddot{u}_i) \Delta t \quad (3)$$

$$\ddot{u}_{i+1} = -M^{-1} C \dot{u}_{i+1} - M^{-1} K u_{i+1} + M^{-1} P(t) \quad (4)$$

通过改变式(2)中的参数 β 达到改变加速度的变化形式。

2 有限元分析模型

2.1 工程背景

某两跨曲线连续梁桥,跨径布置为30 m + 30 m,曲率半径 $R=30$ m,圆心角 $\varphi=114^\circ$ 。边墩支座为抗扭铰支座,中墩支座为固定铰支座。曲线梁高3 m,上翼缘宽8.4 m,底板宽5.6 m,壁厚0.6 m。桥墩宽5.4 m,壁厚1 m;厚2.5 m,壁厚0.5 m。取相等的墩高均为 L m,另一墩高为 $\lambda \times L$ m。

2.2 曲线桥梁模型

为便于分析,引入参数墩高比 λ ,用以表征变高墩与等高墩的高度之比。将两跨曲线连续梁桥的桥墩墩高进行随机布置,并假定:

(1) 桥梁主梁截面及支座约束形式均不变化,

仅对墩高进行变参数研究;

(2) 有两个桥墩高度相等均为 L ,另一桥墩为变高墩,墩高 $\lambda \times L$ 。

根据假定,两跨曲线桥梁结构简化为 I 类(边墩为变高墩)和 II 类(中墩为变高墩)墩高布置形式(图 1)。

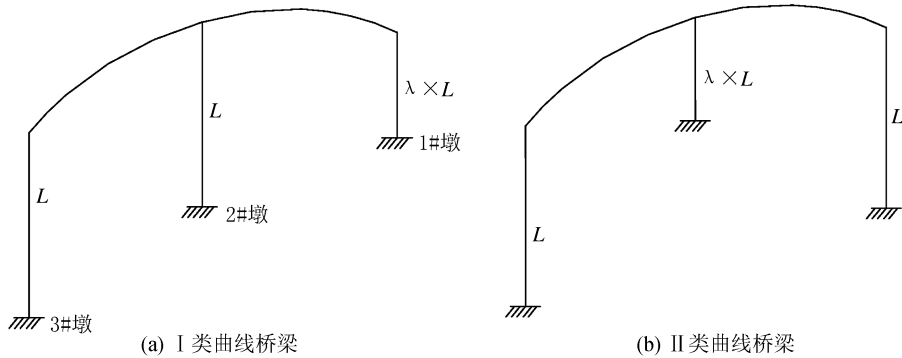


图 1 两类墩高布置形式

Fig.1 Two kinds of pier height arrangement

主梁和桥墩均采用 3 维线弹性梁单元,支座采用弹簧单元,抗压刚度取 1 000 kN/m,剪切刚度取 300 kN/m。采用 Newmark- β 法对多自由度曲线桥梁结构进行动力响应分析。

由于研究具有普遍性,不针对某一特定场地,地震波选用具有代表性的 El-Centro 波,地震波输入方向为 1# 和 3# 桥墩连线方向。

3 结果分析

对两类存在墩高差布置的曲线桥梁进行地震动时程响应分析时,选取以下 4 个结构特征参数进行

考察:结构基本周期;各墩顶径向位移;中墩顶主梁弯矩和扭矩;变高墩墩底剪力和弯矩。

3.1 I 类桥梁仿真结果分析

3.1.1 结构基本周期

I 类曲线桥梁结构的基本周期如表 1 所列。通过分析可知,I 类曲线桥梁结构的基本周期随桥墩高度 L 增大而增大,随墩高比 λ 的增大而减小。

3.1.2 墩顶径向位移

通过有限元软件仿真计算,图 2 给出了 I 类曲线桥梁各墩顶径向位移随墩高比和墩高参数的变化关系曲线。

表 1 I 类曲线桥梁结构基本周期

Table 1 Basic period of curved bridge I

桥墩高度 /m	墩高比									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
20	0.81	0.79	0.77	0.74	0.70	0.66	0.60	0.53	0.50	0.48
15	0.54	0.53	0.51	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.36	0.35
10	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26	0.26	0.25
5	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22

在地震动作用下,1# 和 3# 墩顶径向位移较大。1# 墩顶径向位移随墩高比 λ 和墩高 L 的增大而增大;参数墩高 L 比参数墩高比 λ 对 3# 墩顶径向位移影响更敏感。对于曲线连续梁桥,当桥梁的首尾桥墩发生较大径向位移时,易导致横桥向落梁破坏模式。

由图 2(b)可看出,对于 2# 墩顶径向位移,当墩高比 $\lambda < 1$ 时,径向位移随墩高比 λ 的增大而减小;

当墩高比 $\lambda > 1$ 时,径向位移随墩高比 λ 的增大而增大。这主要是由于当墩高比 λ 越接近于 1 时,结构的刚度分布越均匀,曲线桥梁桥墩变形以桥墩的弱轴弯曲为主,即为切向运动。而当墩高比远离 1 时,结构由于 1# 桥墩的影响,使得其振动为平面内的摆动,主要发生径向振动。此外,看图易知,2# 墩顶径向位移随墩高 L 的增大而增大。

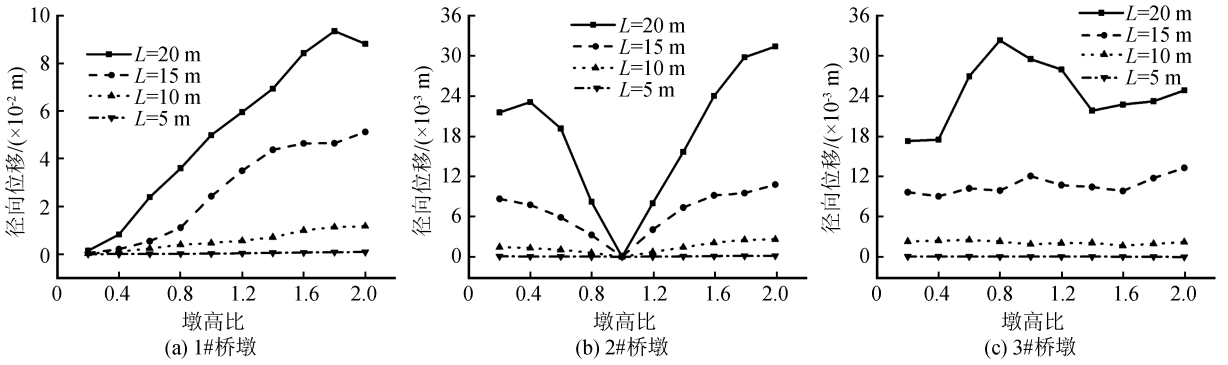


图2 墩顶径向位移

Fig.2 Radial displacement at the pier top

3.1.3 中墩顶主梁扭矩、弯矩

中墩顶主梁扭矩、弯矩分析结果如图3所示。通过分析,当墩高 L 较小 ($L=5$ m) 时,中墩顶主梁扭矩随墩高比的变化基本无变化;当墩高较高 ($L \geq$

10 m) 时,主梁扭矩随墩高比 λ 增大而增大。

当墩高较低时,中墩顶主梁弯矩随墩高比的增大呈现增大趋势。当墩高较高,墩高比 $\lambda < 1$ 时,中墩顶主梁弯矩随墩高比的增大而减小;墩高比 $\lambda > 1$

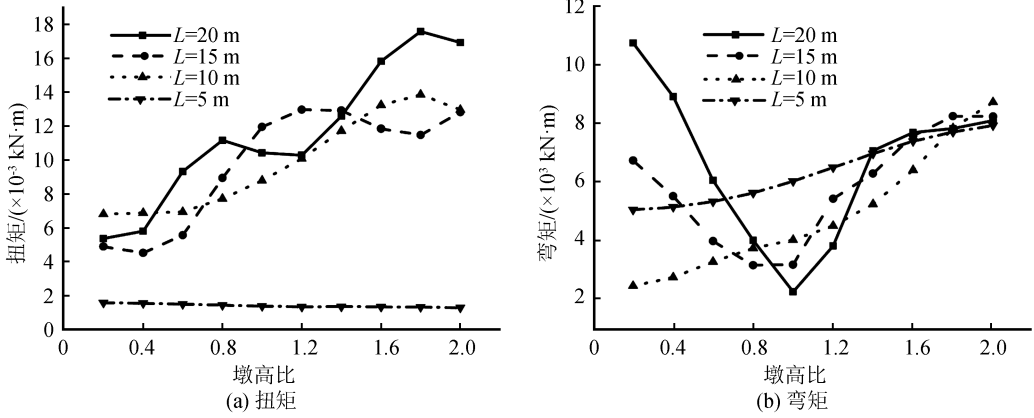


图3 中墩顶主梁扭矩、弯矩

Fig.3 Torque and bending moment of girder at the pier top

时,中墩顶主梁弯矩随墩高比增大而增大。

3.1.4 变高墩墩底剪力、弯矩

I类曲线桥梁的变高桥墩为1#墩,墩底剪力、

弯矩如图4所示。

分析图4表明,当墩高 L 较低时,墩底径向和切向剪力较小,并随墩高比的变化基本无变化;墩底

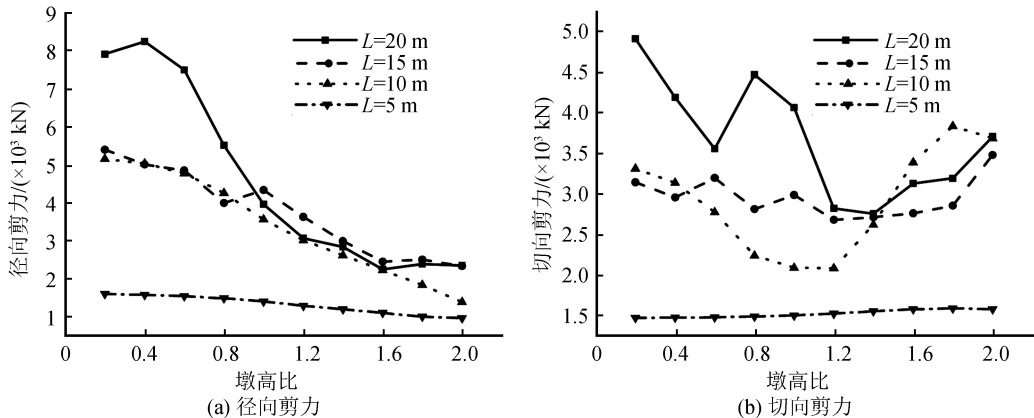


图4 1#墩底剪力

Fig.4 Shear force at the bottom of pier 1#

径向剪力随墩高 L 的增大成增大, 随墩高比 λ 的增大而减小; 切向剪力随墩高 L 的增大而增大, 随墩高比 λ 的增大先减小后增大。

图 5 给出了变高桥墩的墩底弯矩。对比图 5

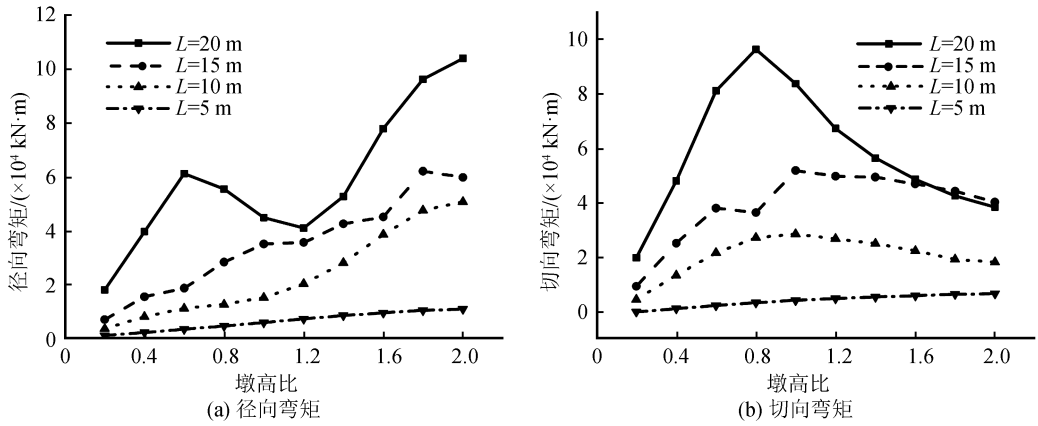


图 5 1#墩底弯矩

Fig.5 Bending moment at the bottom of pier 1#

随墩高的增大而更加明显。

3.2 II类桥梁结果分析

3.2.1 结构基本周期

II类曲线桥梁基本周期如表 2 所列。

表 2 II类曲线桥梁结构基本周期

Table 2 Basic period of curved bridge II

桥墩高度 /m	墩高比									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
20	0.82	0.81	0.79	0.76	0.72	0.66	0.57	0.44	0.34	0.32
15	0.57	0.56	0.54	0.52	0.49	0.44	0.38	0.30	0.27	0.26
10	0.38	0.37	0.35	0.33	0.31	0.28	0.24	0.23	0.23	0.23
5	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22

3.2.2 墩顶径向位移

图 6 给出了各桥墩墩顶的径向位移。

分析图 6 可知, 墩高较低时, 墩高比 λ 对各墩顶径向位移的影响较小; 墩高较高时, 1# 和 3# 墩顶径向位移随墩高 L 和墩高比 λ 的增大而增大, 2#

通过分析可知, 随着桥墩高度 L 的增加, 基本周期增大。随墩高比 λ 的增大而减小。与 I 类曲线桥梁相比, II 类曲线桥梁结构基本周期基本相等, 整体略偏小。

墩顶径向位移随墩高比的增大先增大后减小。此外, 通过比较 1#、3# 墩与 2# 墩顶径向位移发现, 1# 和 3# 桥墩墩顶径向位移远大于 2# 墩顶径向位移, 这是由于对该类桥梁, 桥墩及主梁沿中墩对称, 在 earthquake 荷载作用下结构出现绕中墩的平面内扭转振

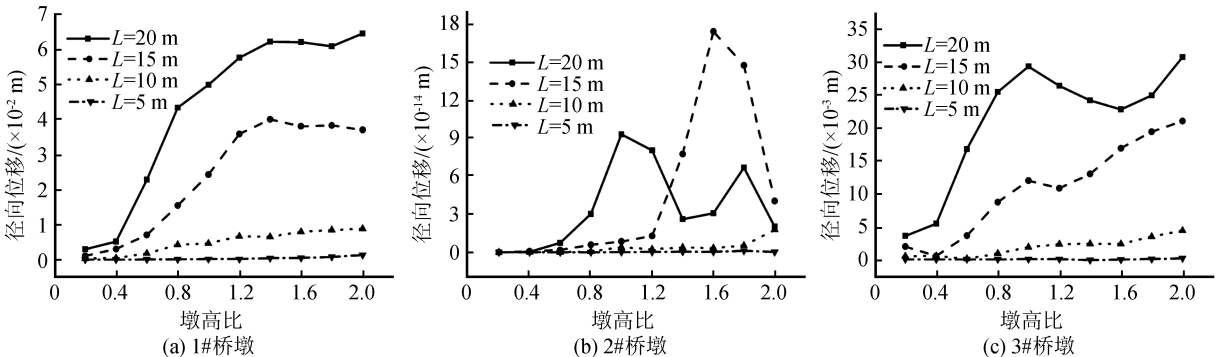


图 6 墩顶径向位移

Fig.6 Radial displacement at the pier top

动,使得1#桥墩和3#桥墩均在各自的径向有较大的位移响应,而作为扭转中心的2#桥墩在径向的位移分量较小。

与I类桥梁桥墩顶径向位移比较可知,II类桥梁桥墩顶位移均较小,尤以2#桥墩最为显著。

3.2.3 中墩顶主梁扭矩、弯矩

分析图7可知,当墩高较高,墩高比 $\lambda < 0.6$ 时,

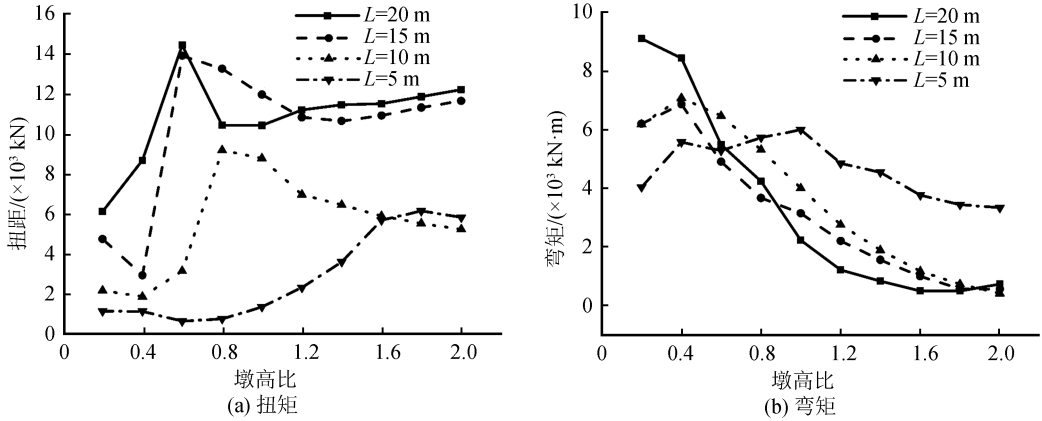


图7 中墩顶主梁扭矩、弯矩

Fig.7 Torque and bending moment of girder at the pier top

3.2.4 变高墩墩底剪力、弯矩

对于II类曲线桥梁,变高墩为2#墩。2#墩底切向剪力及径向弯矩相对较小,这主要是由于桥墩切向

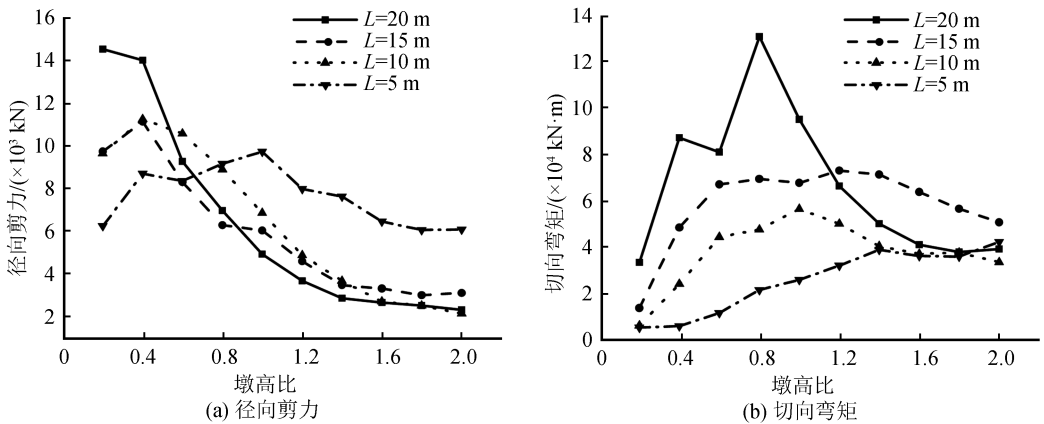


图8 2#墩墩底剪力、弯矩

Fig.8 Shear force and bending moment at the bottom of pier 2#

墩底径向剪力随墩高比的增大而减小。当墩高比 $\lambda < 0.6$ 时,墩底径向剪力随墩高 L 的增大而增大;当墩高比 $\lambda > 0.6$ 时,墩底径向剪力随墩高的增大而减小。对于墩底切向弯矩,随墩高 L 的增大而增大,随墩高比 λ 的增大先增大后减小,并且该趋势随墩高的增大而更加明显。

主梁扭矩随墩高比的增大而增大;墩高比 $0.6 < \lambda < 1.2$ 时,主梁扭矩随墩高比的增大而减小;墩高比 $\lambda > 1.2$ 时,主梁扭矩随高比的增大而出现缓慢增大。墩高较低时,主梁扭矩随墩高比增大而增大。

主梁弯矩随墩高比 λ 的增大而减小。当墩高比 $\lambda < 0.6$ 时,随墩高 L 的增大而增大;当墩高比 $\lambda > 0.6$ 时,随墩高 L 的增大而减小。

的剪切刚度较小,使得分配的剪力较小,弯曲变形主要集中在切向。本处仅对径向剪力和切向弯矩进行分析。图8给出了内力随墩高比变化的关系曲线。

4 结论

本文通过对存在墩高差的两跨曲线连续梁进行结构动力分析,探讨了参数墩高 L 和墩高比 λ 对结构动力响应及结构动力特性的影响规律。主要结论如下:

(1) 对于 I 类曲线桥梁,墩高对墩顶径向位移影响较敏感;中墩顶主梁扭矩及弯矩与墩高和墩高比关系较复杂,参数耦合效果较强;墩高比对变高墩墩底剪力和弯矩影响大;基本周期随桥墩高度 L 增大而增大,随墩高比 λ 的增大而减小。

(2) 对于 II 类曲线桥梁,墩高比对各墩顶径向位移影响较敏感;参数墩高和墩高比对中墩顶主梁扭矩及弯矩影响机理较复杂,耦合效果较强;变高墩墩底剪力、弯矩与墩高 L 和墩高比 λ 存在明显的影响关系,墩底径向剪切和切线弯矩很小;基本周期随桥墩高度 L 增大而增大,随墩高比 λ 的增大而减小。

(3) 参数墩高 L 和墩高比 λ 对 I 类和 II 类曲线桥梁结构的震动响应和结构动力特性影响规律各异。相同点:中墩顶主梁内力弯、扭耦合作用机理较复杂;难以用很少参数表征。不同点:对墩顶径向位移的影响敏感参数不同;II 类曲线桥梁结构的基本周期整体较 I 类曲线桥梁结构的基本周期大,这表明在相同条件下,II 类曲线梁桥结构的整体刚度要比 I 类曲线梁桥小。

参考文献(References)

- [1] 蒋劲松,庄卫林,刘振宇.汶川地震百花大桥震害调查分析[J].桥梁建设,2008,38(6):41-44,52.
JIANG Jingsong, ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu. Investigation and Analysis of Seismic Damage to Baihua Bridge in Wenchuan Earthquake[J]. Bridge Construction, 2008, 38(6): 41-44, 52.
- [2] 李鸿晶,陆鸣,温增平,等.汶川地震桥梁震害的特征[J].南京工业大学学报(自然科学版),2009,31(1):24-29.
LI Hongjing, LU Ming, WEN Zengping, et al. Characteristics of Bridge Damages in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition), 2009, 31(1): 24-29.
- [3] 程麦理,李青宁,尹俊红,等.非规则高墩曲线桥梁振动台试验研究[J].振动与冲击,2016,35(2):24-30.
CHENG Maili, LI Qingning, YIN Junhong, et al. Shaking Tables Tests of Irregular Curved Bridge with High Piers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 24-30.
- [4] 王巾杰.空间地震动作用下曲线连续梁桥随机动力响应研究[D].北京:北京工业大学,2013.
WANG Jinjie. Study on the Dynamic Response of Curved Continuous Bridges under Spatial Seismic Excitation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [5] 李青宁,朱坤,高依强.多点激励下不同墩高对曲线桥地震响应分析[J].交通科技与经济,2013,15(5):92-96.
LI Qingning, ZHU Kun, GAO Yiqiang. Research on Seismic Responses of Curved Bridge with Different Pier Heights under Multi-Support Excitation[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2013, 15(5): 92-96.
- [6] 蒋锋杰.城市曲线高架桥的抗震体系与动力性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
JIANG Fengjie. Research on the Seismic Response Characteristic and Seismic Resistance System of the City Curve Viaduct [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [7] 程麦理,李青宁,闫磊,等.多点激励下非规则高墩曲线桥梁地震响应试验研究[J].振动工程学报,2016,29(5):874-880.
CHENG Maili, LI Qingning, YAN Lei, et al. Experimental Study on Seismic of Irregular High Piers Curved Bridge under Multi-Point Excitation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(5): 874-880.
- [8] 陈彦江,胡彤.墩高差对山区曲线梁桥动力特性影响研究[J].工业建筑,2016,6(增2):279-281.
CHEN Yanjiang, HU Tong. Study of Pier Height Difference Impact on Dynamic on Dynamic Property of Mountain Curved Beam Bridge [J]. Industrial Construction, 2016, 46 (Supp2), 279-281.
- [9] 李援越.桥墩参数和墩梁连接形式对弯梁桥地震响应的影响研究[J].公路,2016,61(12):77-81.
LI Yuanyue. Research on the Influence of Pier Parameters and Pier-Girder Connection Forms on Seismic Response of Curved Girder Bridge[J]. Highway, 2016, 61(12): 77-81.
- [10] 王艳,陈淮,李杰,等.曲率半径和墩高对大跨刚构桥自振特性及抗震性能的影响分析[J].世界桥梁,2014,42(3):65-70.
WANG Yan, CHEN Huai, LI Jie, et al. Effect of Curvature Radius and Pier Height on Natural Vibration Property and Seismic Performance of Long Span Rigid-Frame Bridge [J]. World Bridges, 2014, 42(3): 65-70.
- [11] 李喜梅,杜永峰.非平稳地震激励下隔震曲线梁桥振动控制研究[J].地震工程学报,2016,38(1):103-108,115.
LI Ximei, DU Yongfeng. Vibration Control of Isolated Curved Girder Bridges under Nonstationary Seismic Excitation [J]. Northwestern Seismological Journal, 2016, 38(1): 103-108, 115.