

文章编号:1005-0523(2014)03-0029-06

双柱式桥墩刚度对桥梁地震响应分析

陈水生, 黄里

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为研究桥墩刚度对高墩桥梁抗震性能的影响,以带溪高架桥为研究背景,利用midas-civil选波工具选取合适地震波,建立了一致激励地震作用下的连续梁桥,并考虑P- Δ 效应和非线性的影响,分析桥墩高度、桥墩截面尺寸及形式对桥梁抗震影响。通过改变墩径(墩径由1.2 m变化至2.4 m)抗震分析表明双柱墩直径对墩顶位移影响效果并不明显,墩径过大会导致桥墩内力较大;对不同墩高(墩高由20 m变化至50 m)地震响应分析表明墩高对墩顶位移起到控制作用,但墩高变化对桥墩所受轴力影响不大;由于P- Δ 效应和约束影响,全桥为中间高墩、两边矮墩时具有较小的地震响应;在墩高为30 m情况下,相对于薄壁墩和实体墩,双柱式墩具有较好的抗震性能。

关键词:连续梁桥;桥墩刚度;地震响应;时程分析

中图分类号:U213

文献标志码:A

随着全国范围基础建设和桥梁结构研究的不断深入,高速公路上出现大量的高墩桥梁,桥墩的截面形式及尺寸受地形情况而变化,目前常采用的主要有柱式墩、重力式桥墩、空心薄壁墩等形式,其中双柱墩由于其施工方便和经济性而在高速公路桥梁中广泛使用^[1]。

双柱式高墩桥梁上部结构具有较大质量,整个桥梁结构相当于“头重脚轻”的倒摆式结构体系,在地震作用下,相邻桥墩、支座和主梁形成一个整体,共同抵抗地震作用,将形成相邻桥墩间的耦合振动发生荷载的传递^[2]。而桥墩刚度和形式在地震荷载的传递和内力的分配起到关键的作用,同时影响结构的震动响应。在“基于Midas-civil圆形双柱式墩结构承载能力影响因素分析”^[3]文中较好地阐述了在正常使用下,上部结构跨径为30 m的6片T梁,下部墩高为30 m的情况下,桥墩直径取1.8 m、配筋率取1%较为合理,并能满足承载力和稳定性验算;在相同抗震设防烈度下,双柱墩承载能力随截面配筋率和直径增大而提高,稳定性越好^[3]。然而在地震作用下,桥墩所受轴力是个变化值,桥墩刚度大小将随轴力变化;等高双柱墩会产生轴力-刚度的耦合作用,该作用效果对墩顶位移可忽略不计,但对内力影响较大^[4]。因此桥墩在地震作用下内力分布应充分考虑动力效应;同时桥墩内力分布受墩梁相对刚度影响^[5]。

目前研究中主要探讨了边界约束和非线性对桥梁地震响应分析,较少系统的从结构刚度分析地震响应,而结构刚度对地震响应起到控制的作用,因此系统地研究双柱墩刚度的各种因素对桥梁抗震的影响很有必要。文中以一个工程实例为背景,结合已经优化的双柱墩相关参数^[1],探讨桥墩截面形式、桥墩直径及桥墩高度3个因素对桥梁结构的抗震影响,并得出抗震设计中合理桥墩刚度的选择。

1 地震响应有有限元模型

本文以“奉新至铜鼓(赣湘界)高速公路新建工程带溪高架桥”为背景进行抗震分析和研究。

收稿日期:2014-04-20

基金项目:江西省自然科学基金项目(20114BAB216008);江西省交通厅重点科技项目(2011000002)

作者简介:陈水生(1968—),男,教授,博士,主要研究方向为桥梁工程结构振动与控制。

1.1 模型建立

1) 单元模拟。该桥梁结构为5×30 m的连续梁桥。上部结构为预应力混凝土(后张)6片T梁,T梁尺寸采用通用设计,并用弹塑性梁单元进行有限元模拟;各片主梁之间采用虚拟梁连接。

下部桥墩采用双柱式桥墩,墩径为1.8 m,最大墩高31 m,最低为4 m,每10 m设置一道尺寸为(1.6 m×1.2 m)的横系梁,桥墩实际高度尺寸如表1所示,表中 h_1, h_2 分别表示双柱式左右桥墩的墩高。下部结构采用弹塑性纤维单元模拟;并用midas-civil有限元软件建立全桥3D模型。

2) 边界模拟。支座:支座模型采用板式橡胶支座,根据支座规范^[6]计算支座刚度,并根据计算结果进行弹性连接。除桥台外,主梁和桥墩采用主从约束,其中3#墩设为固定墩。

墩底:墩底采用固结^[7],即忽略基础的变形。

3) 荷载输入。模型中主要考虑恒载(二期和自重)和三向地震荷载,其中地震荷载根据场地和结构的特性选择地震波,并进行峰值调整,不考虑行波效应,相关地震波的选取见第1.2部分内容。

4) 模型分析。为进行地震响应分析,取钢筋混凝土模态阻尼比为5%,首先通过集中质量法将模型中二期和结构质量转换到3D方向;然后采用Ritz向量法进行特征值分析和直接积分法对成桥进行结构动力时程分析。在地震作用下结构动力方程有

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = p(t) \quad (1)$$

式中: $[M], [C], [K]$ 分别对应结构质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{u}(t)\}, \{\dot{u}(t)\}, \{u(t)\}$ 为结构相对地面加速度、速度和位移; $p(t)$ 为动力荷载。

1.2 输入地震波的选择

根据《抗震细则》^[8]的规定,地震响应分析应选择3条地震波,建立6个时程函数,对应地震作用分别为水平和竖直方向。所选地震波应满足地震动三要素的要求,即频谱特性、有效峰值和持续时间要符合规定。

用MIDAS自带选波工具选波,采用了对数坐标系中某一平台频段绝对加速度和拟速度的平均值,由此可将原始地震波转换为合适计算的时程波。地震波特征周期计算按(4)式确定。

有效峰值加速度

$$EPA = S_a / 2.5 \quad (2)$$

有效峰值速度

$$EPV = S_v / 2.5 \quad (3)$$

特征周期

$$T_g = 2\pi EPV / EPA \quad (4)$$

式中: S_a, S_v 分别为绝对加速度反应谱和拟速度反应谱。

场地设计加速度峰值

$$PGA = C_i C_s C_d A \quad (5)$$

横向调整系数为

$$\frac{PGA}{EPAg} \quad (6)$$

表1 1#~4#桥墩高度数据

Tab.1 The 1# to 4# Piers' height data

桥墩编号		h_1/cm	h_2/cm
1#	左幅	341.2	319.4
	右幅	485.4	507.2
2#	左幅	1 812.2	1 790.4
	右幅	2 356.4	2 378.2
3#	左幅	3 095.3	3 079.7
	右幅	3 055.3	3 070.1
4#	左幅	3 115.5	3 108.3
	右幅	3 087.7	3 102.2

根据场地特征周期为 0.55 s, 场地设计加速度峰值为 $0.999\ 6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, 将拟用 EI 波、Taft 波和 Mexico City 波; 并按 (6) 式对 3 条地震波修正 (其中竖直地震荷载取为水平地震的 0.65 倍), 使其达到有效设计峰值加速度, 同时将 3 条波输入桥梁结构中, 分析结构的内力和位移情况, 取计算结果最大值对应的地震波进行抗震分析。3 条波相应的计算结果如表 2 所示。

表 2 拟采用地震波相关参数

Tab.2 Parameters of proposed seismic waves

地震波	实录波特征周期/s	有效峰值加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	横向加速度调整系数	竖向加速度调整系数
EI 波	0.548	2.721 3	0.367 3	0.238 8
Taft 波	0.545	1.321 4	0.756 5	0.491 7
Monica 波	0.479	2.755 4	0.362 8	0.235 8

对墩顶位移时程分析可得, Taft 波输入后, 结构地震响应最大; 因此采用 1952, Taft Lincoln School, 69 Deg 地震波较为合理。

2 数值算例分析

地震动输入的组合采用: 100% 纵向 + 100% 横向 + 50% 竖向; 作用效应组合: 恒载 + 地震作用。

目前对桥梁抗震分析主要以反应谱和时程分析为主^[9], 随机振动由于其复杂性而未广泛应用^[10], 本文将对带溪高架桥进行动力时程分析, 并探讨墩径、墩高和桥墩截面形式对结构抗震的影响。

2.1 双柱式桥墩直径对抗震影响

调整全桥桥墩直径, 桥墩直径分别采取 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 和 2.4 m 7 种模型, 分析高矮墩的内力和位移响应。

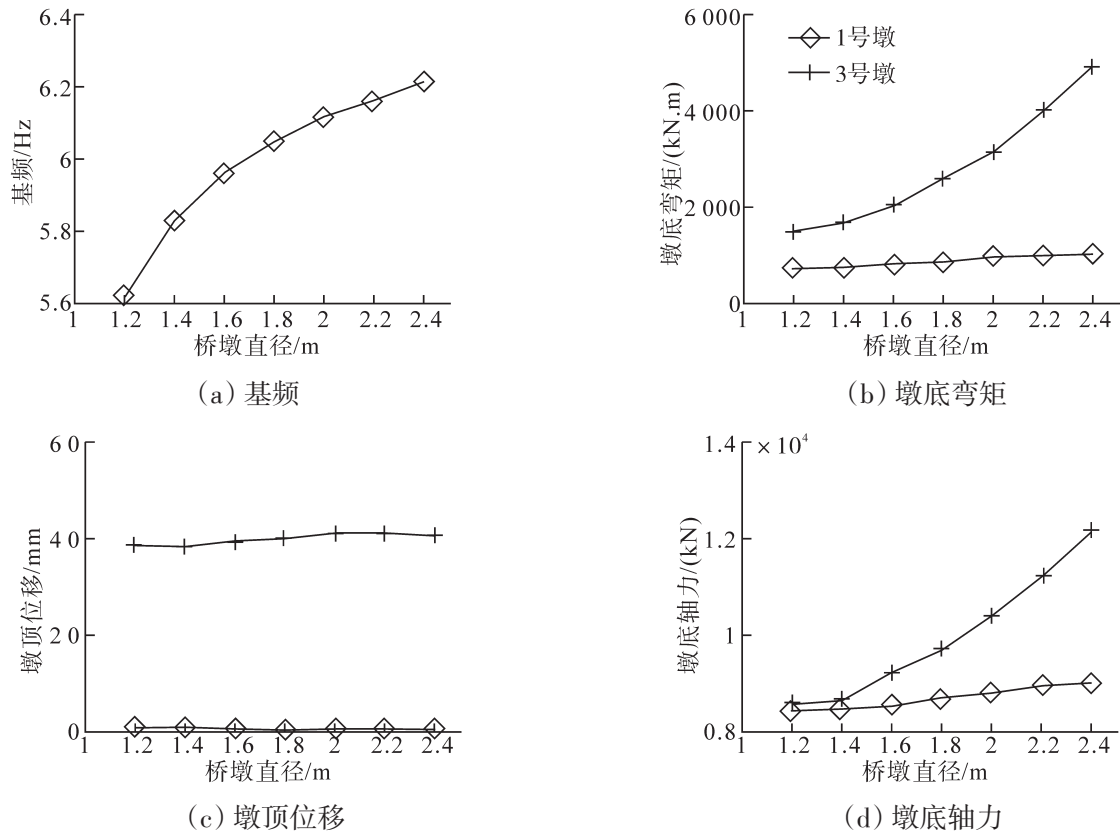


图 1 桥梁振动特性随桥墩直径变化规律

Fig.1 Bridge vibration characteristics with the increase of pier diameters

由图1可知墩底轴力和弯矩随着桥墩直径的增大而增大,同时高墩地震响应变化更为明显,墩底轴力和弯矩具有一定的相关性,即轴力增加的同时弯矩也增大。高墩的墩顶位移较大,而矮墩的墩顶位移几乎为零,在所研究的直径范围内(1.2~2.4 m)内,可知单一的提高桥墩直径对于减少矮墩和高墩的墩顶位移效果并不明显。

2.2 桥墩截面形式对抗震影响

分别采用双柱式墩、实体矩形墩和空心薄壁墩3种桥墩形式,建立有限元模型。双柱式桥墩墩径为1.8 m,另外两种桥墩截面尺寸按纵桥向等刚度原则选取,横桥向按常用尺寸拟定,鉴于空心薄壁式桥墩常用于墩高大于40 m的桥梁,本尺寸拟定参考龙潭河大桥、下元2号大桥等尺寸数据。模型的墩高及桥型采用带溪高架桥相关数据,计算结果如表3所示。

表3 不同桥墩形式的墩底内力和墩顶位移
Tab.3 The internal force and pier top displacement of different piers

桥墩型式	墩底轴力/kN		纵桥向墩顶位移/mm		横桥向墩顶位移/mm	
	矮墩	高墩	矮墩	高墩	矮墩	高墩
柱式墩	8 618.21	9 638.88	0.182	39.995	0.2	15.002
矩形墩	17 567.90	23 409.90	0.165	39.994	0.142	21.692
薄壁墩	19 792.71	17 155.59	0.202	23.481	0.254	27.864

表3中矮墩和高墩的高度分别为4 m和31 m。根据表3结果可知:空心薄壁墩的墩顶纵向位移比双柱式墩、实体矩形墩的墩顶纵向位移小,但具有较大的墩底内力。矩形墩和柱式墩的墩顶位移大小相差不多,但矩形墩具有较大的墩底内力;由此可知:在墩高超过30 m的桥梁中,桥墩采用柱式墩时有较小的墩底内力和墩顶位移,在满足内力和位移验算的情况下,具有较好的抗震效果。

2.3 桥墩刚度分布对抗震影响

将5跨连续梁桥按其桥墩刚度分布特点建立4种模型:桥型一至桥型四,如图2所示,各桥型的最大墩高为31 m,通过调整全桥的墩高以改变桥墩刚度,研究桥墩刚度分布对桥梁结构的基本频率、墩底内力和墩顶位移影响;另外在桥型三的基础上再分别建立全桥墩高均为20,40,50 m 3种桥型。对各种桥型均进行了地震响应计算,有关计算结果如图3和表4所示。

由图3(a)可知,全桥墩高从20 m增大至40 m,墩顶纵向位移呈增加趋势;但在墩高为50 m的情况下,墩顶位移反而变小,出现了较为“反常”的现象;同时对墩顶横桥向位移计算得到:全桥墩高为50 m的墩顶位移是40 m墩的1.462倍。这主要是由于在桥墩高度增加的同时,墩顶纵桥向受到主梁和支座的约束表现地更为明显,从而横桥向地震响应表现的很活跃。

由表4可知,桥型四和其它桥型对比:桥梁结构按照中间较矮、两边高墩设置比中间高墩、两边矮墩设置的桥梁结构周期小;同时会导致桥墩内力分配较为不均匀,这主要是由于中间“矮墩”对结构有个“约束”的效果(如图3(d)),这样不利于桥墩截面设计和材料的使用,建议该种桥型可从中间“矮墩”处分割为两联设计;全桥采用等高桥墩的结构也会增加墩底的内力,如图3中的桥型三。要使桥墩得到较为理想的

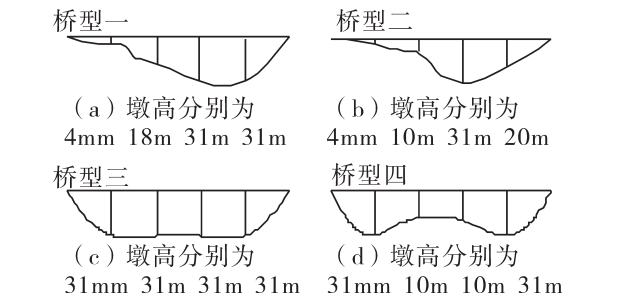


图2 四种不同墩高桥型
Fig.2 Four bridges with different pier heights

表4 不同桥型自振周期
Tab.4 The natural period of different bridges

桥型	桥型一	桥型二	桥型三	桥型四
一阶周期/s	1.0374	1.0203	1.0737	1.0117

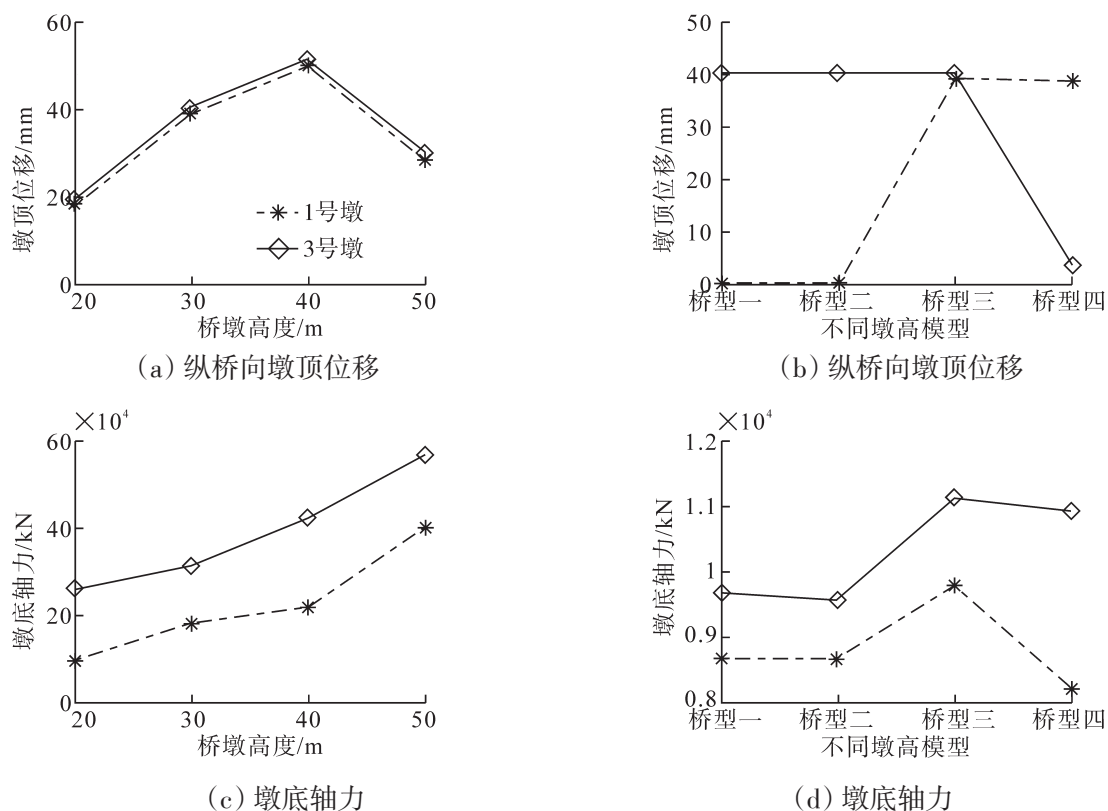


图3 桥墩位移与内力随墩高变化规律

Fig.3 Pier displacement and internal force with the increase of pier height

内力分布形式,可参考桥型一和桥型二的桥墩分布形式。并根据计算结果得出:最高的桥墩对桥梁振动基频起到控制作用。

3 结论

通过对带溪高架桥地震响应分析,可以得出以下主要结论:

1) 在高墩桥梁结构抗震设计中,应根据场地条件和结构特性选择桥墩形式和截面尺寸。仅通过增大桥墩直径来减少墩顶位移效果并不明显,柱式墩直径增大将导致桥墩刚度增大,也增大了墩底的内力,这样对结构反而不利,同时浪费材料。

2) 为使全桥各墩所分配的内力大小较为接近,每一联桥的中间墩应布置为高度较大的桥墩、两边设置为矮墩;如遇到河床地势相对较高的情况下,可将全桥从中间“矮墩”处分割为两联设计。

3) 在桥墩形式和截面尺寸保持不变的情况下,一定范围内增大桥墩高度,将导致墩底轴力和墩顶纵向位移增大;但桥墩高度超过某一值时,纵向位移反而减少。同时经研究表明:墩高对墩顶位移起到控制作用,同时也对全桥振动基频起到控制作用。

4) 高度为30 m的双柱墩,在满足抗震设计要求情况下,相对实体矩形墩和空心薄壁墩而言,具有较好的抗震性能。

参考文献:

- [1] 盛伟兵.高速公路桥墩高结构型式分析研究[D].南昌:华东交通大学,2013:81-82.
- [2] 王克海.桥梁抗震研究[M].北京:中国铁道出版社,2007:381-382.
- [3] 盛伟兵,陈水生.基于 Midas-civil 圆形双柱式墩结构承载能力影响因素分析[J].公路,2013(3):94-98.
- [4] 魏斌,李建中.双柱墩地震反应的轴力-刚度耦合作用[J].土木建筑与环境工程,2012,34(4):66-71.
- [5] 陈亮,李建中,张文学.梁墩刚度分布对连续梁桥横桥向规则性的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(9):1175-1180.
- [6] 中华人民共和国交通运输部.JTT663-2006 公路桥梁板式橡胶支座规格系列[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [7] 高玉峰,施洲,秦世强.双柱式高墩桥梁地震响应结构参数影响分析[J].公路交通科技,2011,28(3):67-75.
- [8] 中华人民共和国交通运输部.JTG/TB02-01-20 08.公路桥梁抗震设计细则[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [9] 马健中.高桥墩桥梁抗震分析方法[J].公路交通科技,2004,21(12):66-68.
- [10] 李锦华,陈水生.非高斯随机过程模拟与预测的研究进展[J].华东交通大学学报,2011,28(6):1-4.

Effects of Double-column Pier Stiffness on Seismic Response of Bridge

Chen Shuisheng, Huang Li

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to investigate effects of the pier stiffness on the seismic performance of the bridge, this paper, adopting the Daixi Viaduct as the research object and the midas-civil wave tool for selecting the appropriate seismic wave, establishes a continuous girder bridge under the action of uniform excitation. By taking the $P-\Delta$ and nonlinear effects into account, it analyzes the influence factors such as different pier heights, section sizes and forms. The seismic analysis results show that the diameter of double column pier has a little effect on the pier top's displacement by changing the diameter from 1.2 meters to 2.4 meters, and the diameter oversize leads to the increase of pier force; The height of pier has control over the pier top displacement, but the pier height has a little effect on the axial force of pier by changing the height from 20 meters to 50 meters; Because of $P-\Delta$ effect and the influence of boundary constraints, the bridge whose middle pier is high and side piers are short has smaller seismic response; In case the pier height is 30 meters, the double column pier has better seismic performance, compared to the thin-walled pier and solid pier.

Key words: continuous beam bridges; the pier stiffness; seismic response; time-history analysis