

桥墩型式对大跨公路连续刚构桥车桥耦合振动响应的影响

陈水生,朱治蒸,桂水荣,赵 辉

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘 要 目的 以广东省某一高等级公路大桥为研究对象,分析桥墩型式对车桥耦合动力响应的影响,探究桥梁具有较小动力响应的桥墩型式。方法 将三轴汽车简化为空间三维弹簧-质量-阻尼体系,建立桥梁的有限元模型,基于模态综合法和 Newmark- β 算法求解桥梁的振动响应,考虑桥面不平顺、车辆匀速行驶及加速行驶、横桥向车辆数量对桥梁中跨跨中和桥梁墩顶动力响应的影响。结果 薄壁空心墩桥梁的位移响应和四柱墩桥梁弯矩响应最大,而双薄壁墩桥梁的位移响应和弯矩响应均为最小;双薄壁墩桥梁与其他桥墩型式桥梁相比,其位移响应最大降低 67%,弯矩响应最大降低 100%。结论 桥墩型式对桥梁振动响应的影响明显,不同桥墩型式的桥梁动力响应差值较大;三种桥墩型式桥梁中,双薄壁墩桥梁的动力响应最小,双薄壁墩能有效降低桥梁的动力响应。

关键词 连续刚构桥;桥墩型式;车桥耦合振动;桥面不平顺

中图分类号 TU997;U448.23

文献标志码 A

Influence of Bridge Pier Type on Vehicle-Bridge Coupling Vibration Response of Long-span Highway Continuous Rigid Frame Bridge

CHEN Shuisheng, ZHU Zhizheng, GUI Shuirong, ZHAO Hui

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

Abstract: A certain highway bridge in Guangdong province is studied in order to analyze the influence of bridge pier type on the vehicle-bridge coupling dynamic response, and explore the bridge pier form with less dynamic response. The three-axis vehicle was simplified into a three dimensional spring-mass-damping system and the finite element model of the bridge was established. Based on the modal synthesis method and Newmark- β algorithm, the vibration response of the bridge was calculated, and the influence of bridge deck roughness, vehicle uniform speed

收稿日期:2020-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目(12062006)

作者简介:陈水生(1968—),男,教授,博士,主要从事桥梁振动与控制方面研究。

and acceleration, transverse bridge to the number of vehicles on the dynamic response of the bridge was considered. The results show that the displacement response of the thin-walled hollow pier bridge and the bending moment response of the four-column pier bridge are the largest, while the displacement response and bending moment response of the double-thin-walled pier bridge are the smallest. Compared with other pier types, the displacement response and bending moment response of the double-thin-walled pier bridge are reduced by 67% and 100% respectively. Therefore, the influence of pier type on the vibration responses of bridge is obvious, and the difference of dynamic responses between different pier types is large. Among the three types of bridge piers, the dynamic responses of the double-thin-walled pier bridge are the smallest, and the double thin-walled pier can effectively reduce the dynamic responses.

Key words: continuous rigid frame bridge; bridge pier type; vehicle-bridge coupling vibration; bridge deck roughness

连续刚构桥是一种组合体系结构,具有变形小,行车舒适性高,内力分布合理,跨越能力强等优点,被广泛应用在大跨度公路桥梁中,已发展成为公路桥梁极具代表性的桥型之一,因此,连续刚构桥车桥耦合振动问题值得被重视^[1-5]。凌敏等^[6]计算了连续刚构桥跨中挠度及冲击系数,认为由不同材料构成的腹板对主梁振动响应的影响较为明显。郭钰等^[7]重点研究了如何减弱高墩大跨连续刚构桥的车致振动响应,提出了一种加装液态黏滞阻尼器减弱车桥耦合动力响应的方法。周勇军等^[8]以双薄壁墩弯连续刚构桥为例,研究了桥面路况等级、曲率半径、桥墩高度等参数变化时,最不利断面的动力响应及相应的冲击系数,将计算出的冲击系数与各国规范值进行对比,得出了各个国家冲击系数规范值均偏小的结论。周亮福等^[9]利用 LS-DYNA 分别建立了双薄壁墩偶数跨刚构-连续梁桥、连续梁桥、连续刚构桥的仿真模型,分析了三种桥梁控制截面的动挠度和动应变,分析结果表明连续刚构桥跨中截面动应变小于其他两种桥梁型式,连续刚构桥能明显降低跨中动应变响应。樊建平等^[10]分析了路面不平度和车辆不同行驶速度对单跨刚构桥、三跨连续刚构桥跨中挠度和顺桥向位移的影响。LI Yongle 等^[11]研究了地震荷载对超高墩连续刚构桥的车桥耦合振动系统的影响,认为地震荷载是影响车桥系统响

应的最主要因素,地震和桥梁振动的双重激励严重影响过桥车辆的安全。

上述研究成果主要集中在单一桥墩型式的动力响应研究,对于不同型式桥墩的桥梁振动响应研究甚少,而桥墩又是大跨连续刚构桥的关键构件^[12-14]。基于此,为了研究桥墩截面型式的改变对桥梁动力响应的影响,笔者采用三种常见的桥墩截面型式,即薄壁空心墩、双薄壁墩、四柱墩,以桥梁中跨跨中截面和桥梁墩顶截面作为动力响应计算的控制截面,分析桥墩型式对控制截面动力响应的影响,得到桥梁具有较小动力响应的桥墩型式。

1 车桥耦合振动基本理论

1.1 车辆模型

以三轴后八轮汽车为研究对象,将车辆简化为 9 自由度弹簧-质量-阻尼体系,车辆模型及相关参数见文献[15],根据达朗贝尔原理建立车辆的振动方程:

$$M_v \ddot{Z} + C_v \dot{Z} + K_v Z = F_v^{int} \tag{1}$$

式中: M_v, C_v, K_v 分别为车辆的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; Z 为车辆自由度列阵, $Z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_b \ \theta \ \varphi]^T$; F_v^{int} 为车辆行驶过程中车轮作用在桥面的惯性荷载列阵。

1.2 桥梁模型

采用有限元方法对桥梁结构进行离散,建立桥梁结构有限元模型,桥梁振动方程可

表示为

$$\mathbf{M}_b\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_b\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_b\mathbf{y} = -(\mathbf{F}_v^{int} + \mathbf{F}_g).$$
 (2)

式中: $\mathbf{M}_b, \mathbf{C}_b, \mathbf{K}_b$ 分别为桥梁的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; \mathbf{y} 为单元节点位移列阵; \mathbf{F}_g 为车辆自重产生的荷载列阵。

采用模态叠加法可以将桥梁振动方程改写为

$$\mathbf{E}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{X}\mathbf{q} = -\Phi^T(\mathbf{F}_v^{int} + \mathbf{F}_g).$$
 (3)

其中,

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix}_{s \times s},$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \omega_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_s \end{bmatrix}_{s \times s},$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\xi_s\omega_s \end{bmatrix}_{s \times s}.$$

式中: s, ξ_s, \mathbf{q} 分别为桥梁结构所取模态阶数、第 s 阶模态阻尼比、模态广义坐标列阵; Φ 为桥梁的模态矩阵。

1.3 车桥耦合振动方程

假定车辆车轮与桥面不脱离,根据车轮与桥面接触点的变形协调条件,可以得到车轮相对桥面接触点的位移与接触点桥面初始竖向位移量、车轮位移的关系,如式(4)所示;根据车轮与桥面接触点力的平衡条件,可以推导出车轮接触点相互作用力表达式:

$$\Delta y_i = z_i - r_i - \bar{y}_i.$$
 (4)

$$F_i^{int} = k_i \Delta y_i + c_i \Delta \dot{y}_i.$$
 (5)

式中: Δy_i 为车轮相对桥面接触点的位移; z_i 为第 i 个车轮位移; r_i, F_i^{int} 分别为第 i 个车轮接触点桥面不平顺值、第 i 个车轮作用力; \bar{y}_i 第 i 个车轮接触点桥面初始竖向位移量,表达式为 $\bar{y}_i = \mathbf{N}_i \Phi \mathbf{q}$,其中, \mathbf{N}_i 为第 i 个车轮接触点单元形状插值函数矩阵^[15]; k_i, c_i 为第 i 个车轮的刚度系数、阻尼系数。

将式(4)代入式(5)中,第 i 个车轮作用

在桥面的惯性荷载可以表示为

$$F_i^{int} = k_i(z_i - \mathbf{N}_i \Phi \mathbf{q} - r_i) + c_i(\dot{z}_i - \dot{r}_i - v \dot{\mathbf{N}}_i \Phi \mathbf{q} - \mathbf{N}_i \Phi \dot{\mathbf{q}}).$$
 (6)

那么车轮作用在桥梁单元节点的惯性荷载矩阵为

$$\mathbf{F}_v^{int} = \sum_{i=1}^{nn} \mathbf{N}_i \mathbf{F}_i^{int}.$$
 (7)

式中: nn 为车辆轮胎个数。

令: $\mathbf{d} = \begin{bmatrix} q \\ Z \end{bmatrix}$

联立式(3)、式(7)可以得到车桥耦合方程,表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}\mathbf{d} = \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_g.$$
 (8)

式中: $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 分别车桥耦合模型中的广义质量矩阵、广义阻尼矩阵以及广义刚度矩阵, \mathbf{F}_w 为桥面不平顺引起的动荷载列阵, \mathbf{F}_g 为车辆自重引起的动荷载列阵^[15]。式(8)中的各参数矩阵都是关于时间的变量,因此采用 Newmark- β 数值积分法进行求解。

2 桥梁有限元模型

鸡鸭水道大桥为广东省中山市横二线东段新建工程线路上的一座大型桥梁,跨径布置为(88+155+88)m,为双幅桥,单幅桥面宽度 15.75 m,其有限元模型如图 1 所示。



图1 刚构桥有限元模型示意图

Fig. 1 Finite element model of rigid frame bridge

主梁截面为单箱单室箱梁变截面型式,主梁高度由根部 9.2 m 向跨中 3.6 m 以二次抛物线变化;桥墩采用双薄壁墩,高 21 m。根据桥梁的实际尺寸,分别建立了双薄壁墩(横桥向宽度 8 m,顺桥向宽度 1.6 m,双肢间距为 7 m)、四柱墩(横桥向宽度 3 m,横桥向间距 2 m,顺桥向宽度 2 m,顺桥向间距 3 m)、空心薄壁墩(横桥向宽度 8 m,顺桥向

宽度 1.6 m,壁厚 0.5 m) 桥梁结构的有限元模型,3 种桥墩的有限元模型如图 2 所示。

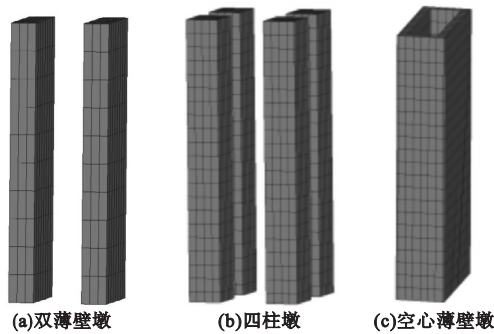


图 2 不同桥墩型式有限元模型

Fig. 2 Finite element models of different pier forms

3 桥梁动力响应参数分析

车桥耦合振动响应受诸多因素影响,其中行车速度、桥面不平顺、车辆行驶加速度、横桥向车辆数量这几个因素对车桥耦合振动响应的影响较为显著^[16-20],为了研究在不同的行车速度、桥面不平顺等级、车辆行驶加速度下的桥梁的最大振动响应,笔者采用的三

轴后八轮重载车辆在横桥向的布置为偏载布置形式,即车辆行驶在行车道 1,左车轮与行车道 1 边缘相距 0.5 m。鸡鸭水道大桥的跨中横断面尺寸及桥面行车道布置如图 3 所示。

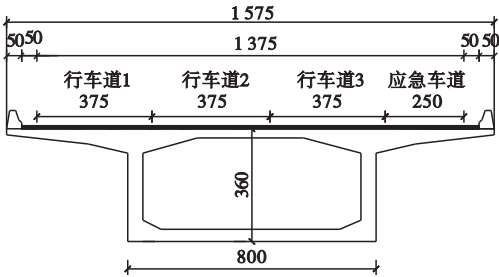


图 3 桥梁跨中横断面及行车道布置

Fig. 3 The cross section size and carriageway layout of bridge span

3.1 车辆行驶速度对桥梁振动响应的影响

为了分析车辆行驶速度对不同桥墩型式的桥梁振动响应的影响,取车辆行驶速度 $v=5\sim40\text{ m/s}$,以 5 m/s 的车速递增,桥面路况等级为 A 级,桥梁中跨跨中和墩顶响应最大值如图 4 所示。

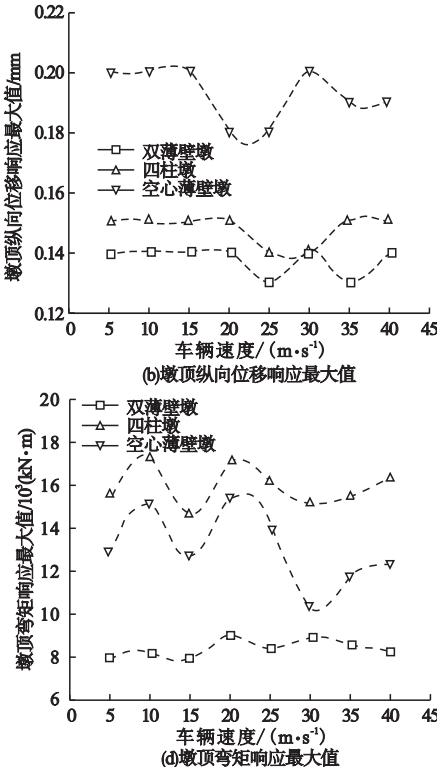
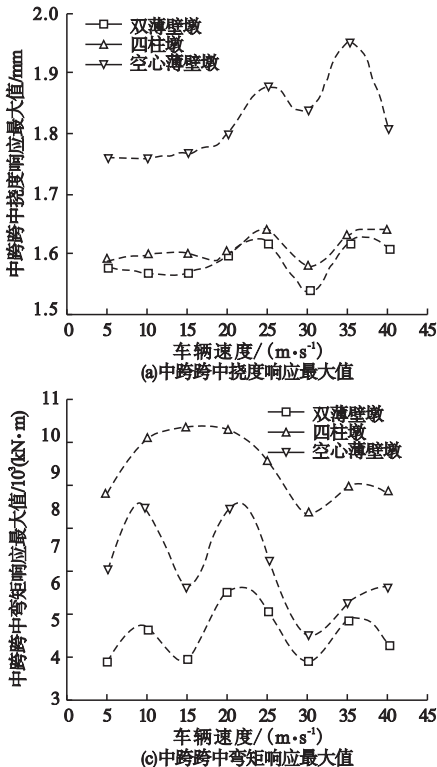


图 4 车辆不同行驶速度下桥梁的动力响应最大值

Fig. 4 Maximum dynamic response of bridge under different vehicle driven speeds

从图 4(a)、图 4(b)得知:不同桥墩型式的中跨跨中挠度响应及墩顶纵向位移响应均比较小,中跨跨中挠度响应最大值为 1.95 mm,墩顶纵向位移响应最大值为 0.20 mm。在车辆速度由小增大的过程中,双薄壁墩型式桥梁的中跨跨中挠度和墩顶纵向位移均为最小,四柱墩桥梁、空心薄壁墩桥梁的中跨跨中挠度分别比双薄壁墩桥梁的中跨跨中挠度增加 10%、20%,四柱墩桥梁、空心薄壁墩桥梁墩顶纵向位移响应分别比双薄壁墩桥梁墩顶纵向位移增加 10%、48%。因此,桥墩型式对桥梁中跨跨中挠度和墩顶纵向位移的影响较大,且对桥梁墩顶纵向位移的影响大于对中跨跨中挠度的影响。另外,车速在 20 m/s 时,不同桥墩型式的桥梁中跨跨中挠度差值和墩顶纵向位移差值最小,而车速在 30 m/s 时,不同桥墩型式的桥梁中跨跨中挠度差值和墩顶纵向位移差值最大,桥梁位移振动响应对于车辆行驶速度很敏感。

从图 4(c)可以看出,不同桥墩型式的桥

梁中跨跨中弯矩响应也不同,双薄壁墩桥梁中跨跨中弯矩的响应较小,四柱墩、空心薄壁墩这两类桥墩型式的桥梁中跨跨中弯矩与双薄壁墩型式桥梁中跨跨中弯矩相比,四柱墩型式桥梁中跨跨中弯矩最大增加幅度为 109%、空心薄壁墩型式桥梁中跨跨中弯矩最大增加幅度为 50%;而从图 4(d)能够得出,在车辆速度由小增大的过程中,双薄壁墩墩顶弯矩最小,其次为空心薄壁墩,四柱墩最大。四柱墩、空心薄壁墩桥梁的墩顶弯矩分别是双薄壁墩桥梁墩顶弯矩的 2 倍、1.8 倍。由此可见,不同桥墩型式的桥梁中跨跨中弯矩、墩顶弯矩差别均比较大。

3.2 路面不平度对桥梁振动响应的影响

路面不平度是影响车桥耦合振动响应的一个重要因素^[21-23],为探究不同桥墩型式的桥梁动力响应随桥面路况等级的变化情况,取车速 $v = 30\text{ m/s}$,桥面路况等级分别采用光滑、A 级、B 级、C 级四种等级路面,桥梁振动响应计算结果如图 5 所示。

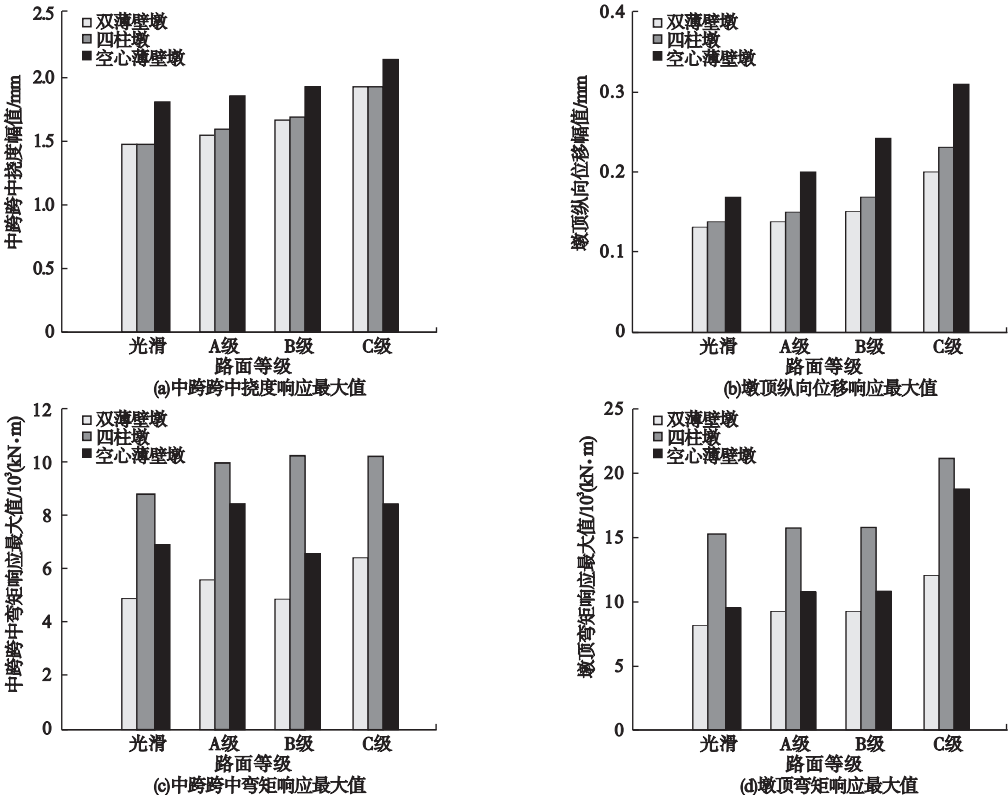


图 5 不同路况等级下的控制截面动力响应最大值

Fig. 5 Maximum dynamic response of control section under different deck conditions

从图 5(b)可以得知,双薄壁墩桥梁墩顶纵向位移响应最小,空心薄壁墩桥梁墩顶纵向位移最大,且两者差值随桥面路况等级的降低而增大;桥面路况等级为光滑时,空心薄壁墩桥梁墩顶纵向位移比双薄壁墩桥梁墩顶纵向位移增加 34%;桥面路况等级为 A 级时,空心薄壁墩桥梁墩顶纵向位移比双薄壁墩桥梁墩顶纵向位移增加 45%;桥面路况等级为 B 级时,空心薄壁墩桥梁墩顶纵向位移比双薄壁墩桥梁墩顶纵向位移增加 55%,桥面路况等级为 C 级时,空心薄壁墩桥梁墩顶纵向位移比双薄壁墩桥梁墩顶纵向位移增加 67%。因此,不同桥墩型式和桥面路况等级对桥梁墩顶纵向位移影响较大,而且提高桥面路况等级可以减小桥墩型式对桥梁墩顶纵向位移的影响。

而从图 5(c)得知,双薄壁墩型式桥梁的中跨跨中弯矩最小,四柱墩、空心薄壁墩这两类桥墩型式桥梁的中跨跨中弯矩在光滑桥面路况下比双薄壁墩型式桥梁的中跨跨中弯矩

分别增加 98%、31%;A 级桥面路况下分别增加 68%、12%;B 级桥面路况下分别增加 68%、12%;C 级桥面路况下分别增加 59%、55%。从图 5(d)可知,四柱墩、空心薄壁墩这两类桥墩型式桥梁的墩顶弯矩响应均大于双薄壁墩型式桥梁墩顶弯矩响应。在光滑桥面路况下,四柱墩、空心薄壁墩桥梁的墩顶弯矩与双薄壁墩桥梁的墩顶弯矩相比,其最大增加幅度分别为 68%、13%;在 A 级桥面路况下,最大增加值分别为 70%、16%;在 B 级桥面路况下,最大增加值分别为 70%、16%;在 C 级桥面路况下,最大增加值分别为 77%、15%。

3.3 车辆加速度对桥梁振动响应的影响

车辆过桥时,不总是以恒定的速度行驶,车辆会在行驶过程中制动或者加速,为了研究车辆非匀速行驶状态下的桥梁振动响应,设车辆以初始速度为 5 m/s,加速度的递增量从 1 m/s² 增到 6 m/s²,计算出控制截面动力响应结果(见图 6)。

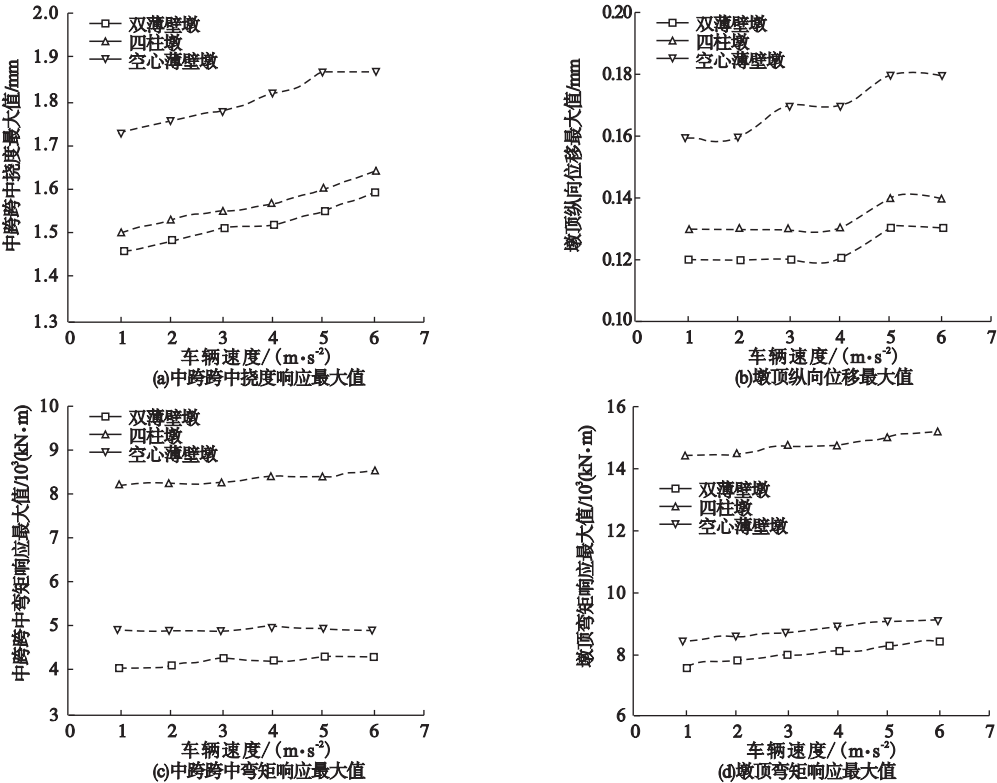


图 6 车辆加速行驶下控制截面的动力响应最大值

Fig. 6 Maximum dynamic response of control section under acceleration of vehicle

从图 6(a)可以得出:桥梁中跨跨中挠度随着车辆加速度的提高而增大,呈现明显的正相关性,墩顶的纵向位移与车辆加速度关系虽没图 6(a)明显,但也有着正相关性的趋势。双薄壁墩型式桥梁的中跨跨中挠度和墩顶纵向位移最小,四柱墩、空心薄壁墩这两类桥墩型式桥梁的中跨跨中挠度分别比双薄壁墩桥梁中跨跨中挠度增加 3%、20%;四柱墩、空心薄壁墩桥梁墩顶纵向位移分别比双薄壁墩桥梁墩顶纵向位移增加 11%、43%;从弯矩响应图 6(c)可以得出:桥梁中跨跨中弯矩随着加速度的提高而不断增加,但桥梁中跨跨中弯矩增加幅度并没有中跨跨中挠度增加幅度那么明显,四柱墩桥梁中跨跨中弯矩明显大于双薄壁墩桥梁的中跨跨中弯矩,两者相比,四柱墩桥梁响应值最大增加幅度为 95%;从图 6(d)可以看出:同一加速度,不同型式桥墩的桥梁墩顶弯矩差值比较大,四柱墩、空心薄壁墩墩顶弯矩均比双薄壁墩墩顶弯矩大。因此,采用双薄壁墩可以减小

桥梁墩顶弯矩,而且其他两类墩的墩顶弯矩与双薄壁墩墩顶弯矩相比,其差值均随着车辆加速度的提高而不断增大。

3.4 横桥向车辆数量对桥梁振动的影响

多数情况下,大型重载车辆在行车道 2 和行车道 3 上行驶,轻型车辆在行车道 1 行驶(见图 3),当交通量增加或交通拥堵的情况下重载车辆才会进入到行车道 1 行驶,因此桥梁横桥向的重载车辆数量可能会从 1 辆增至 3 辆,为了研究横桥向重载车辆数量对桥梁振动响应的影响,将车辆的行驶状况分为单车行驶、双车并排行驶、三车并排行驶。工况 1 为单车行驶在行车道 1,工况 2 为双车分别行驶在行车道 2 和行车道 3,工况 3 为三车分别行驶在 3 个行车道(见图 7)。多车并排行驶的车辆横向间距均为 2 m。设车辆过桥时匀速行驶,车速 $v=30\text{ m/s}$,桥面不平顺等级为 A 级,不同桥墩型式的桥梁振动响应最大值如表 1 所示。

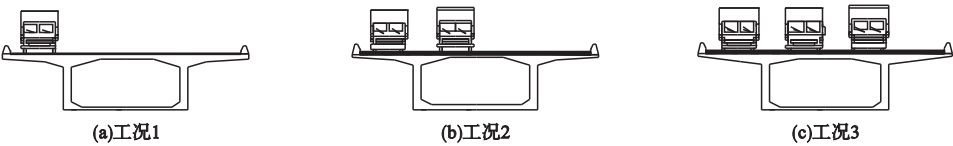


图 7 车辆横桥向位置示意图

Fig. 7 Transverse position diagram of vehicle under different working conditions

表 1 桥梁在不同工况下的动力响应最大值

Table 1 Maximum dynamic response of the bridge under different working conditions

桥墩 型式	加载 工况	中跨跨中挠度 y/mm	墩顶纵向 位移 z/mm	中跨跨中弯矩 $M_y/10^3\text{ (kN}\cdot\text{m)}$	墩顶弯矩 $M_z/10^3\text{ (kN}\cdot\text{m)}$
双 薄 壁 墩	工况 1	1.54	0.14	4.88	8.91
	工况 2	3.54	0.32	11.38	20.48
	工况 3	9.02	1.08	16.73	29.01
四 柱 墩	工况 1	1.58	0.14	8.31	15.17
	工况 2	3.63	0.34	19.15	34.86
	工况 3	9.39	1.18	25.08	46.58
薄 壁 空 心 墩	工况 1	1.84	0.20	5.47	10.35
	工况 2	4.24	0.47	12.71	24.06
	工况 3	11.03	1.15	18.51	32.66

从表1可以看出,桥梁的振动响应均随着横桥向车辆数量的增大而不断提高,其中以薄壁空心墩桥梁中跨跨中挠度和四柱墩桥梁墩顶弯矩提高最为明显,薄壁空心墩桥梁中跨跨中挠度由1.84 mm增大到11.03 mm,四柱墩桥梁墩顶弯矩从 $1.51 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 增大到 $4.66 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$,横桥向车辆数量对桥梁振动响应的影响显著,在车辆数量由一辆增至三辆的过程中,双薄壁墩桥梁的位移和弯矩响应均最小,薄壁空心墩桥梁的位移响应最大,四柱墩弯矩响应最大,而且四柱墩桥梁的弯矩响应远高于双薄壁墩桥梁的弯矩响应。

4 结 论

(1)桥梁位移振动响应对车辆行驶速度很敏感,车速在20 m/s时,不同桥墩型式的桥梁中跨跨中挠度差值和墩顶纵向位移差值最小,而车速在30 m/s时,不同桥墩型式的桥梁中跨跨中挠度差值和墩顶纵向位移差值最大。

(2)桥面路况等级越低,不同桥墩型式桥梁的振动响应差值就越大,提高桥面路况等级可以减小桥墩型式对桥梁振动响应的影响。

(3)不同桥墩型式桥梁的中跨跨中挠度、中跨跨中弯矩、墩顶纵向位移、墩顶弯矩均与车辆加速度呈正相关性关系,并且不同桥墩型式的桥梁墩顶弯矩差值随着车辆加速度的提高而增大。

(4)双薄壁墩桥梁的位移和弯矩响应均最小,薄壁空心墩桥梁的位移响应最大,四柱墩桥梁弯矩响应最大;双薄壁墩桥梁与其他桥墩型式桥梁相比,其位移响应最大降低67%,弯矩响应最大降低100%,双薄壁桥墩型式能有效降低桥梁的位移和弯矩响应。

参考文献

[1] 陈水生,罗浩,桂水荣. 曲率半径对连续曲线梁桥车桥耦合振动的影响[J]. 沈阳建筑大学

学报(自然科学版),2020,36(2):290-298.
(CHEN Shuisheng, LUO Hao, GUI Shuirong. Effect of curve radius on vehicle-bridge coupled vibration of continuous curved girder bridge[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 290-298.)

[2] CANTERO D, MCGETRICK P, KIM C W, et al. Experimental monitoring of bridge frequency evolution during the passage of vehicles with different suspension properties[J]. Engineering structures, 2019, 187: 209-219.

[3] KOC M A, ESEN I. Modelling and analysis of vehicle-structure-road coupled interaction considering structural flexibility, vehicle parameters and road roughness[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 31(5):2057-2074.

[4] ERDOGAN Y S, CATBAS N F. Seismic response of a highway bridge in case of vehicle-bridge dynamic interaction[J]. Earthquakes and structures, 2020, 18(1):1-14.

[5] 李子春. 桥墩形式对连续刚构桥动力特性的影响[J]. 中国公路学报,2011,24(2):70-76.

(LI Zichun. Influence of bridge pier form on dynamic characteristic of continuous rigid frame bridge[J]. China journal of highway and transport, 2011, 24(2):70-76.)

[6] 凌敏,夏超逸. 高速公路连续刚构桥车桥耦合振动与行车舒适性研究[J]. 公路工程,2019,44(5):18-24.

(LING Min, XIA Chaoyi. Research on vehicle-bridge coupled vibration and driving comfort of expressway continuous rigid frame bridge[J]. Highway engineering, 2019, 44(5):18-24.)

[7] 郭钰,金宝宏,张志涛,等. FVD在高墩大跨连续刚构桥中车桥相互作用的应用研究[J]. 公路,2017,62(5):140-143.

(GUO Yu, JIN Baohong, ZHANG Zhitao, et al. Application of FVD to vehicle-bridge interaction in high-pier and long-span continuous rigid frame bridges[J]. Highway, 2017, 62(5):140-143.)

[8] 周勇军,韩智强,赵煜,等. 高墩大跨弯连续刚构桥冲击系数计算公式[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(2):207-213.

(ZHOU Yongjun, HAN Zhiqiang, ZHAO Yu, et al. Dynamic load allowance formula of long-span continuous curved rigid frame bridge with high piers[J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science edition), 2016, 48(2):207-213.)

[9] 周亮福,扈振涛,李杰,等. 基于LS-DYNA的偶数跨刚构-连续梁桥车桥耦合振动分析[J]. 公路工程,2019,44(4):90-97.

(ZHOU Liangfu, HU Zhentao, LI Jie, et al. Vehicle-bridge coupling vibration of even span rigid frame-continuous beam bridge based on

- LS-DYNA[J]. Highway engineering, 2019, 44 (4): 90 - 97.)
- [10] 樊建平, 吴孟畅, 胡隽, 等. 基于界面接触算法的车桥耦合动力学分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 52 - 58.
(FAN Jianping, WU Mengchang, HU Juan, et al. Dynamic analysis of vehicle-bridge interaction based on interfacial contact algorithm[J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(4): 52 - 58.)
- [11] LI Yongle, CHEN Ning, ZHAO Kai, et al. Seismic response analysis of road vehicle-bridge system for continuous rigid frame bridge with high piers[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2012, 11(4): 593 - 602.
- [12] LI Shaohua, REN Jianying. Investigation on three-directional dynamic interaction between a heavy-duty vehicle and a curved bridge[J]. Advances in structural engineering, 2018, 21(5): 721 - 738.
- [13] 刘扬, 万林云, 殷新锋, 等. 高墩大跨连续刚构桥的行车舒适性研究[J]. 中外公路, 2014, 34(1): 129 - 133.
(LIU Yang, WAN Linyun, YIN Xinfeng, et al. Study on driving comfort of high pier and long span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of China & foreign highway, 2014, 34(1): 129 - 133.)
- [14] 陈水生, 罗浩, 桂水荣. 曲线连续梁桥在车辆制动作用下的动力响应[J]. 土木与环境工程学报, 2019, 42(2): 95 - 106.
(CHEN Shuisheng, LUO Hao, GUI Shuirong. Study on dynamic response of curved continuous girder bridge under vehicle braking [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2019, 42(2): 95 - 106.)
- [15] 桂水荣, 陈水生, 万水. 基于路面一致激励车桥耦合非平稳随机振动分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 908 - 915.
(GUI Shuirong, CHEN Shuisheng, WAN Shui. Analysis of consistent stimulus of road roughness on vehicle-bridge coupling nonstationary random vibrations[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2018, 38(5): 908 - 915.)
- [16] ZHOU Shenglin, LI Fengming, ZHANG Chuanzeng. Vibration characteristics analysis of disordered two-span beams with numerical and experimental methods[J]. Journal of vibration and control, 2018, 24(16): 3641 - 3657.
- [17] ZAKERI J A, FEIZI M M, SHADFAR M, et al. Sensitivity analysis on dynamic response of railway vehicle and ride index over curved bridges[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part-K journal of multi-body dynamics, 2017, 231(1): 266 - 277.
- [18] YAO Yadong, XU Baishun, WANG Yan. Research on the train-bridge coupled vibration and dynamic performance of steel box hybrid girder cable-stayed railway bridge[J]. Tehnicki vjesnik-technical gazette, 2020, 27(2): 656 - 664.
- [19] KARIMI A H, ZIAEI-RAD S. Nonlinear coupled longitudinal-transverse vibration analysis of a beam subjected to a moving mass traveling with variable speed[J]. Archive of applied mechanics, 2015, 85(12): 1941 - 1960.
- [20] ROMERO J A, LOZANO-GUZMAN A A, OBREON-BIOSCA S A, et al. A plane model of the interaction of a vehicle with the road infrastructure [J]. Advances in engineering software, 2018, 117: 46 - 58.
- [21] 邓露, 王芳. 汽车制动作用下预应力混凝土简支梁桥的动力响应及冲击系数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9): 52 - 58.
(DENG Lu, WANG Fang. Study of the dynamic responses and impact factors of simply-supported prestressed concrete girder braking [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences), 2015, 42(9): 52 - 58.)
- [22] 陈水生, 赵辉, 桂水荣, 等. 基于LS-DYNA公路桥车桥耦合的车辆模型研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(6): 747 - 756.
(CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, GUI Shuirong, et al. Vehicle model research on vehicle bridge coupling of highway bridge based on LS-DYNA [J]. Chinese journal of computational mechanics, 2019, 36(6): 747 - 756.)
- [23] 李梅, 陈树汪. 高墩大跨度连续刚构桥空间动力特性分析[J]. 公路交通技术, 2013(5): 58 - 60.
(LI Mei, CHEN Shuwang. Analysis for spatial dynamic characteristics of high-pier large-span continuous steel structure bridges [J]. Technology of highway and transport, 2013(5): 58 - 60.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)