文章编号:1674-2974(2024)05-0088-07 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024050

地震作用下车辆–公路桥梁耦合作用的能量机理

徐艳[1],林国才[2],崔存玉[2†]
[1. 土木工程防灾国家重点实验室(同济大学),上海 200092;
2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092]

摘 要:由于地震作用下车辆和公路桥梁相互耦合作用的复杂性,目前对其相互作用机理的研究较少,导致各国现行公路桥梁抗震设计规范关于桥梁在地震作用时是否需要考虑活载作用仍然存在分歧.现有研究表明,车辆既可能对桥梁的地震响应产生有利影响,也可能产生不利的影响.本文在已有的研究基础上,对车桥耦合接触行为进行简化模拟,采用能量法对车辆–公路桥梁耦合作用机理进行分析.结果表明:车桥耦合作用对输入到桥梁水平方向能量的影响可以忽略不计,但会导致输入到桥梁竖向总能量的减小,因而使桥梁的竖向地震响应减小,而输入到车辆竖向的能量则主要来自桥面振动;此外,车辆质量越小,桥梁振动产生的对车辆水平方向的能量输入越大.

关键词:车桥耦合;能量法;调谐质量阻尼器;桥梁抗震;接触单元
中图分类号:U442.55 **文献标志码**:A

Energy Mechanism of Vehicle–highway Bridge Dynamic Interaction under Earthquake

XU Yan[1], LIN Guocai[2], CUI Cunyu[2†]
[1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering(Tongji University), Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Due to the complexity of seismic coupling between vehicles and highway bridges, current research on the mechanism of vehicle–bridge interaction under seismic action is relatively scarce, leading to diverse specifications about whether live load should be taken into account in national seismic bridge design codes. Existing studies have shown that vehicles possibly would produce beneficial effect on bridge seismic responses in one circumstance but adverse effects in another. The simulation of contact behaviors between vehicle and bridge is simplified in this study. On this basis, the mechanism of vehicle–bridge interaction is analyzed thoroughly by employing the energy method. Analysis results demonstrate that the impact of vehicle–bridge interaction on horizontal energy input to the bridge is negligible. However the interaction can reduce the total energy input to the bridge in the vertical direction, therefore reducing the vertical seismic responses of the bridge, while input energy to the vehicle's vertical direction comes mainly from the bridge's vibration. On the other hand, the smaller the vehicle

* **收稿日期**:2023-04-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878492), National Natural Science Foundation of China(51878492)
作者简介:徐艳(1976—),女,浙江杭州人,同济大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: cuicunyu89@yeah.net

mass, the greater the horizontal input energy to the vehicle caused by bridge vibration.

Key words: vehicle–bridge coupling; energy method; tuned–mass damper; seismic design of bridges; contact element

由于公路中的车辆荷载具有随机性,并且地震发生的概率很小,持续时间很短,我国2020年新修订的《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231—01—2020)[1]规定进行公路桥梁抗震设计时不需要考虑地震作用与活载的组合.日本《道路桥示方书•同解说•V耐震设计编》[2]也同样不要求把车辆荷载与地震作用进行组合.我国现行《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)[3]仅仅规定对于城市轨道交通桥梁在横桥向需要计入50%活载引起的地震力.近年来,随着我国经济的快速发展,居民汽车拥有量在2011—2020年的十年间增加了2倍[4],导致城市地区交通量日益增加,交通拥堵严重.在大城市工作日的早晚高峰时段所需通勤时间大约为畅通时段通勤时间的2倍[5].美国*AASHTO Guide specifications for LRFD seismic bridge design*[6]提到对于重要桥梁或者交通流量大和需要通行重型货车的桥梁建议进行专门研究.当需要考虑活载和地震作用的组合时,活载组合系数建议取$\gamma_{EQ} \leqslant 0.5$.欧洲*Eurocode* 8*: Design of structures for earthquake resistance–Part* 2*: Bridges*[7]规定对于高速公路桥梁或者重要桥梁需要计入0.2倍的活载作用.由此可见,目前各国桥梁抗震设计规范对于是否需要考虑车辆荷载与地震作用的组合仍存在分歧.

在2010年2月27日智利的马乌莱(Maule)地震中,Lo Echevers桥(斜交桥,斜交角33°)的东北向桥梁在地震作用下发生顺时针扭转,导致主梁横向限位剪力键剪断,发生了落梁事故,而紧邻的西南向桥梁则仅仅发生了轻微的损伤.由于Lo Echevers东北向桥梁和西南向桥梁采用了相同的设计,又经受了相同的地震作用,震后进行的调查报告未能给出东北向桥梁发生落梁事故的原因[8].但值得注意的是,在地震发生时有多辆汽车正在Lo Echevers东北向桥梁上行驶,伴随着桥梁落梁,发生了翻车事故.

早在20世纪90年代初即有学者开始对车辆–公路桥梁地震耦合响应进行研究[9-10],发现卡车会显著减小桥梁主梁横向位移响应.Wibowo等[11-12]进行了车桥耦合系统振动台试验的研究.试验中对车桥耦合系统同时施加了纵桥向和横桥向的地震激励.振动台试验研究结果表明,车桥耦合作用会减小桥梁的位移加速度和内力响应,并且车桥耦合作用会减少混凝土桥墩在地震作用下的损伤,延缓混凝土桥墩的开裂和保护层混凝土剥落.但随着地震动幅值的增加,车辆的有益作用逐渐减小甚至会增加桥梁的地震响应,车辆造成的桥梁地震响应增加通常在10%~15%的范围之内.Shaban等[13]对一个长12 m、宽3.5 m的单跨简支梁模型进行了振动台试验研究,施加了横向地震激励,桥梁模型采用了板式橡胶支座.试验研究结果发现车辆使主梁横向加速度响应减小15.1%,使支座位移响应减小18.7%.Zhou和Chen[14]通过数值模拟发现车桥耦合作用在竖桥向比横桥向更明显,车辆会抑制桥梁横桥向地震位移响应,但会显著增大桥梁主梁竖向地震位移响应;在地震作用下,车辆的加速度响应超过1.0g,严重威胁车辆的行驶安全.

目前国内外学者对地震作用下车辆–公路桥梁耦合作用的研究取得了一定的进展,然而往往会得出相左的结论,对地震作用下车桥耦合相互作用机理研究不够深入.Wibowo等根据振动台试验结果[11-12]推测车辆可能起到了调谐质量阻尼器的作用.本文作者在文献[15]中对车桥耦合系统的地震响应进行了统计分析,并通过能量法初步解释了车桥耦合相互作用机理.但由于在文献[15]中模拟车辆和桥梁之间的接触力时采用了非线性的接触单元,对车辆进行能量分析时无法有效区分轮胎的弹性势能、滞回耗能和桥梁振动对车辆的能量输入,对车辆进行的能量分析不够准确.因此,本文在文献[15]分析的基础之上,分别采用多段线弹性单元和线弹性单元代替Hertz单元和修正Wen单元对车辆和桥梁在竖向和水平向的接触力进行模拟,有效地区分了车辆轮胎的弹性势能和桥梁振动产生的对车辆的能量输入,通过能量法深入分析了地震作用下车辆–公路桥梁耦合作用机理,为地震引起的车桥耦合作用的研究奠定基础.

1　车辆–公路桥梁耦合简化模型

1.1　车辆–公路桥梁耦合系统控制方程

车桥耦合简化系统如图1(a)所示,通过达朗贝

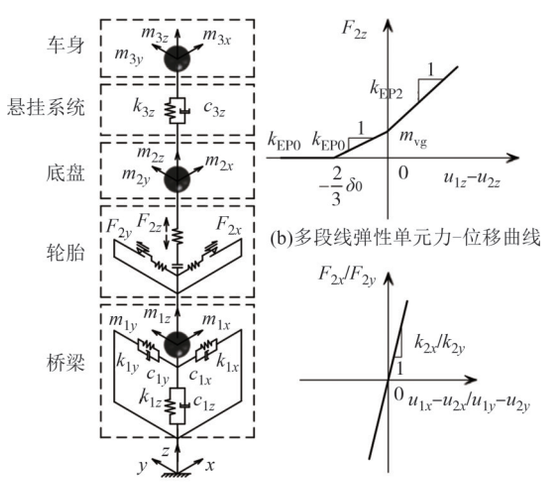
尔动平衡原理[16]建立的车桥耦合系统控制方程由公式(1)~(3)给出[15]:

$$\begin{cases} m_{1x}\ddot{u}_{1x}+c_{1x}\dot{u}_{1x}+k_{1x}u_{1x}+F_{2x}=-m_{1x}\ddot{u}_{gx}, \\ (m_{2x}+m_{3x})\ddot{u}_{2x}-F_{2x}=-(m_{2x}+m_{3x})\ddot{u}_{gx}JF, \\ m_{1y}\ddot{u}_{1y}+c_{1y}\dot{u}_{1y}+k_{1y}u_{1y}+F_{2y}=-m_{1y}\ddot{u}_{gy}, \\ (m_{2y}+m_{3y})\ddot{u}_{2y}-F_{2y}=-(m_{2y}+m_{3y})\ddot{u}_{gy}JF, \\ m_{1z}\ddot{u}_{1z}+c_{1z}\dot{u}_{1z}+k_{1z}(u_{1z}+\delta_{1z})+F_{2z}+m_{1z}g=-m_{1z}\ddot{u}_{gz}, \\ m_{2z}\ddot{u}_{2z}+c_{3z}(\dot{u}_{2z}-\dot{u}_{3z})+k_{3z}(u_{2z}+\delta_{2z}-u_{3z}-\delta_{3z})- \\ \quad F_{2z}+m_{2z}g=-m_{2z}\ddot{u}_{gz}JF, \\ m_{3z}\ddot{u}_{3z}+c_{3z}(\dot{u}_{3z}-\dot{u}_{2z})+k_{3z}(u_{3z}+\delta_{3z}-u_{2z}-\delta_{2z})+ \\ \quad m_{3z}g=-m_{3z}\ddot{u}_{gz}JF \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \delta_{1z}=-(m_{1z}+m_{2z}+m_{3z})g/k_{1z}, \\ \delta_{2z}=\delta_{1z}-[(m_{2z}+m_{3z})g/\mathrm{k}_{2z}]^{\frac{2}{3}}, \\ \delta_{3z}=\delta_{2z}-m_{3z}g/k_{3z} \end{cases} \tag{2}$$

$$JF=\begin{cases} 1, & u_{1z}+\delta_{1z}>u_{2z}+\delta_{2z}; \\ 0, & u_{1z}+\delta_{1z}\leqslant u_{2z}+\delta_{2z} \end{cases} \tag{3}$$

式(1)~(3)中:m、u、c和k分别表示质量、位移、阻尼系数和刚度,点上标表示该项对时间的导数,下标第一个字符1表示桥梁,2表示底盘,3表示车体,下标第二个字符x表示桥梁纵向,y表示桥梁横向,z表示竖向;F_{2x}表示轮胎纵向摩擦力,F_{2y}表示轮胎横向摩擦力;各δ项表示桥梁和车辆在自重作用下相对于地面的静位移;$\ddot{u}_{gx}$、$\ddot{u}_{gy}$和$\ddot{u}_{gz}$分别表示在纵向、横向和竖向的地面加速度.车辆和桥梁的质量、阻尼和刚度等参数的取值与文献[15]相同.



(a)车桥耦合系统示意图 (c)线弹性单元力-位移曲线

图1 车辆-公路桥梁耦合

Fig.1 Vehicle-bridge coupling

1.2 车桥耦合接触行为近似模拟

车辆和桥梁在竖向的接触力F_{2z}通过如图1(b)所示的多段线弹性单元模拟,多段线弹性单元的表达式由式(4)给出.式(4)中,$\delta_0=(m_v g/k_{2z})^{2/3}$;$u_{rz}=u_{1z}-u_{2z}$.为使得通过多段线弹性单元计算得到的结果与Hertz单元计算结果一致,式(4)中的刚度k_{EP1}和k_{EP2}分别取$u_{rz}=0$和$u_{rz}=\delta_0$时Hertz单元的切线刚度.k_{EP1}和k_{EP2}分别由式(5)和式(6)给出.

$$F_{2z}=\begin{cases} 0, u_{rz}<-\dfrac{2}{3}\delta_0; \\ k_{EP1}\left(u_{rz}+\dfrac{2}{3}\delta_0\right), -\dfrac{2}{3}\delta_0\leqslant u_{rz}<0; \\ \dfrac{2}{3}k_{EP1}\delta_0+k_{EP2}u_{rz}, 0\leqslant u_{rz} \end{cases} \tag{4}$$

$$k_{EP1}=\frac{3}{2}(k_{2z}^2 m_v g)^{\frac{1}{3}} \tag{5}$$

$$k_{EP2}=\frac{3\sqrt{2}}{2}(k_{2z}^2 m_v g)^{\frac{1}{3}} \tag{6}$$

式中:$m_v=m_{2z}+m_{3z}$.

在地震作用下,当车辆轮胎主要做弹性振动时,车辆和桥梁之间的水平摩擦力可以通过图1(c)所示的线弹性单元近似模拟.线弹性单元表达式由式(7)给出.

$$F_{2x(y)}=k_{2x(y)}\left(u_{1x(y)}-u_{2x(y)}\right) \tag{7}$$

2 车桥耦合系统地震响应

本文以在1979年美国加利福尼亚Imperial Valley地震中记录到的编号为RSN158的地震作用为例[17],采用修正Wen单元计算得到的车辆和桥梁之间的水平摩擦力F_{2y}如图2所示.对图2中给出的力-位移曲线进行线性拟合可以发现,在地震动RSN158作用下车辆轮胎的力-位移曲线具有很好的线性关系,Pearson相关系数[18]$R=0.99$.经线性拟合得到的轮胎水平刚度k_{2y}约等于初始刚度350 kN/m,说明轮胎以弹性振动为主,可以采用式(7)近似模拟车辆和桥梁在水平方向的接触力.

2.1 线性解与非线性解结果对比

分别采用由式(4)~(6)给出的多段线性单元和由式(7)给出的线性单元代替文献[15]中的Hertz单元和修正Wen单元近似模拟车辆轮胎和桥梁在竖向

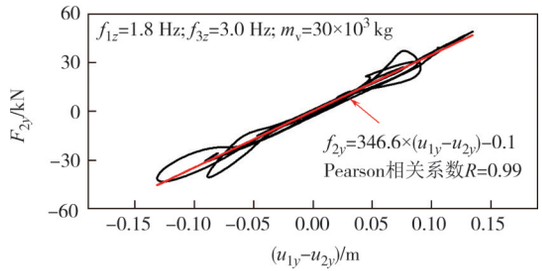
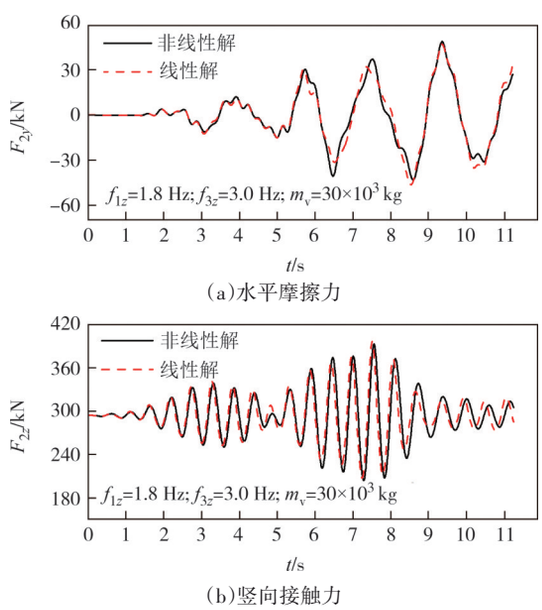


图 2　地震动 RSN158 作用下采用修正 Wen 单元模拟车辆和桥梁水平摩擦计算得到的水平摩擦力 F_{2y}

Fig.2　Horizontal frictional force F_{2y} between vehicle and bridge obtained by using modified Wen element under ground motion RSN158

以及横桥向的接触行为,可以得到如图 3 所示的水平摩擦力 F_{2y} 和竖向接触力 F_{2z} 的时程曲线.由图 3 可以看出,线性解与非线性解结果基本一致.因此,在地震动 RSN158 作用下,可以采用多段线性单元和线性单元分别代替 Hertz 单元和修正 Wen 单元模拟车辆和桥梁在竖向和横桥向的接触行为.



(a)水平摩擦力

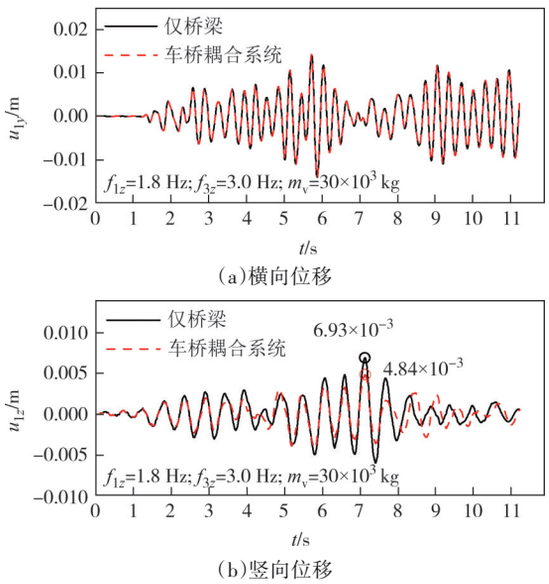
(b)竖向接触力

图 3　地震动 RSN158 作用下接触力对比

Fig.3　Comparison of contact forces under ground motion RSN158

2.2　车辆对桥梁地震响应影响

如图 4(a)所示,在地震动 RSN158 作用下,通过车桥耦合系统计算得到的桥梁横桥向位移响应与不考虑车辆对桥梁地震响应影响时的结果完全一致,车辆对桥梁水平地震响应的影响可以忽略不计.而在地震动 RSN158 作用下,车桥耦合作用使桥梁竖向位移响应减小了 29.6%,如图 4(b)所示.



(a)横向位移

(b)竖向位移

图 4　地震动 RSN158 作用下车辆对桥梁位移响应影响

Fig.4　Influence of vehicle on bridge displacement response under ground motion RSN158

3　车辆–公路桥梁相互作用机理

3.1　能量法简介

基于能量法的设计概念由 Housner 于 1956 年在纪念 1906 年旧金山地震 50 周年的第一届世界地震工程会议上提出[19],这个概念强调研究地震地震动过程中结构能量的变化.他认为,在地震过程中当所有的地震能量传递给结构后,一部分会形成结构的运动,叫作动能,一部分会以应变能的形式储存在结构的变形中,另一部分将以阻尼和非弹性变形的形式消散.最初的能量法主要应用于结构安全性评估,近年来,基于能量的设计方法得到了许多研究人员更广泛的研究,应用于地震响应分析、桥梁抗震加固设计、结构地震损伤分析等.

基于能量法的概念,在地震作用下,传递到车桥耦合系统中的地震能量一部分通过结构阻尼以及车辆和桥梁之间产生的摩擦力耗散掉,另一部分则以动能和弹性势能的形式存储在车桥耦合系统中[16,20–21].对于车桥耦合系统中的桥梁来说,输入能量可以看成由两部分组成:一部分是由地震动产生;另一部分则由车辆振动产生.同理,对于输入到车辆中的能量也可以区分成由地震动产生的部分和由桥梁振动产生的部分.

3.2 能量法计算分析

3.2.1 能量计算公式

由地震动产生的对桥梁和车辆的能量输入由式(8)给出;而由车辆和桥梁振动分别产生的对桥梁和车辆的能量输入则由式(9)给出[22].

$$\begin{cases} E_{I_{1x}} = -\int_0^{u_{1x}} \ddot{u}_{gx}\mathrm{d}u_{1x}, \\ E_{I_{1y}} = -\int_0^{u_{1y}} \ddot{u}_{gy}\mathrm{d}u_{1y}, \\ E_{I_{1z}} = -\int_0^{u_{1z}} \ddot{u}_{gz}\mathrm{d}u_{1z}, \\ E_{I_{2x}} = -\int_0^{u_{2x}} \ddot{u}_{gx}JF\mathrm{d}u_{2x}, \\ E_{I_{2y}} = -\int_0^{u_{2y}} \ddot{u}_{gy}JF\mathrm{d}u_{2y}, \\ E_{I_{2z}} = -\int_0^{u_{2z}} \ddot{u}_{gz}JF\mathrm{d}u_{2z}, \\ E_{I_{3z}} = -\int_0^{u_{3z}} \ddot{u}_{gz}JF\mathrm{d}u_{3z} \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} E_{F_{1x}} = -\int_0^{u_{1x}} \dfrac{F_{2x}}{m_{1x}}\mathrm{d}u_{1x}, \\ E_{F_{1y}} = -\int_0^{u_{1y}} \dfrac{F_{2y}}{m_{1y}}\mathrm{d}u_{1y}, \\ E_{C_{1z}} = -\int_0^{u_{1z}} \dfrac{F_{2z} + k_{1z}\delta_{1z} + m_{1z}g}{m_{1z}}\mathrm{d}u_{1z}, \\ E_{F_{2x}} = \int_0^{u_{2x}} \dfrac{F_{2x,1}}{m_{\mathrm{v}}}\mathrm{d}u_{2x}, \\ E_{F_{2y}} = \int_0^{u_{2y}} \dfrac{F_{2y,1}}{m_{\mathrm{v}}}\mathrm{d}u_{2y}, \\ E_{C_{2z}} = \int_0^{u_{2z}} \dfrac{F_{2z,1}}{m_{2z}}\mathrm{d}u_{2z} \end{cases} \tag{9}$$

式中:$F_{2x,1}$、$F_{2y,1}$和$F_{2z,1}$分别由式(10)(11)确定.

$$F_{2x(y),1} = k_{2x(y)}u_{1x(y)} \tag{10}$$

$$F_{2z,1} = \begin{cases} 0, & u_{1z} - u_{2z} < -\dfrac{2}{3}\delta_0; \\ k_{\mathrm{EP1}}u_{1z}, & -\dfrac{2}{3}\delta_0 \leqslant u_{1z} - u_{2z} < 0; \\ k_{\mathrm{EP2}}u_{1z}, & 0 \leqslant u_{1z} - u_{2z} \end{cases} \tag{11}$$

3.2.2 车桥耦合作用对输入到桥梁的能量的影响

在地震动RSN158作用下,如图5所示,由车辆水平振动产生的对桥梁的能量输入与桥梁中来自地震动的能量输入相比可以忽略不计.因此,如2.3节所述,车辆对桥梁水平地震响应的影响可以忽略不计.但在竖向,与来自地震动的能量输入相比,由车辆振动产生的对桥梁的能量输入不能再被忽略,如图6所示.

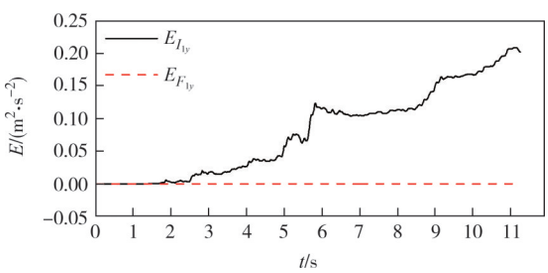


图5 地震动RSN158在横桥向对桥梁的能量输入

Fig.5 Transverse input energy from ground motion RSN158 to the bridge

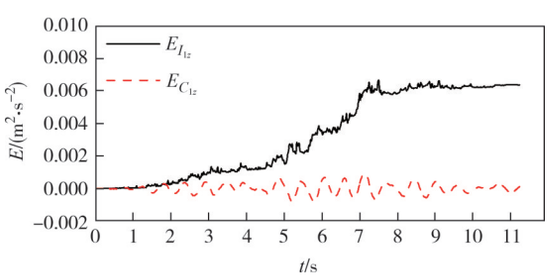


图6 地震动RSN158在竖向对桥梁的能量输入

Fig.6 Vertical input energy from ground motion RSN158 to the bridge

由于车桥耦合作用,地震动RSN158作用下在竖向输入到桥梁中的总能量$E_{I_{1z}} + E_{C_{1z}}$小于仅考虑桥梁时由地震动输入的能量,如图7所示.因此,如2.3节所述,在地震动RSN158作用下,车桥耦合作用使桥梁竖向位移响应减小.

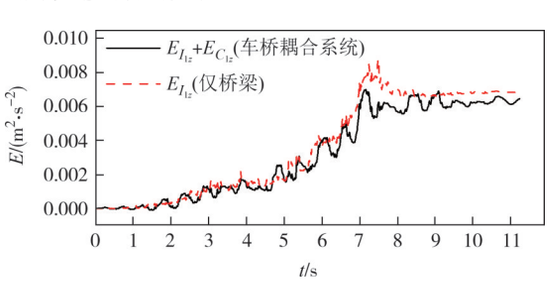


图7 地震动RSN158作用下在竖向输入到桥梁的能量对比

Fig. 7 Comparison of vertical input energy from ground motion RSN158 to the bridge

3.2.3　车桥耦合作用对输入到车辆的能量的影响

如图 8 所示,在地震动 RSN158 作用下,在横桥向输入到车辆的能量主要来自地震动,而由桥梁振动产生的对车辆的能量输入可以忽略.但是随着车辆质量的改变,这一情况会发生变化.

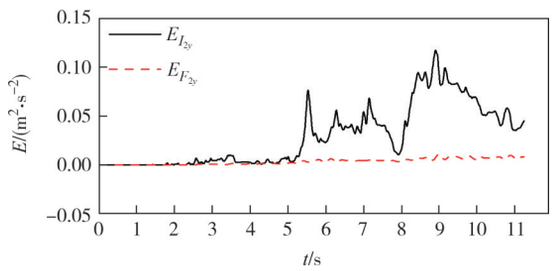


图 8　地震动 RSN158 作用下在横桥向输入到车辆的能量

Fig.8　Transverse input energy from ground motion RSN158 to the vehicle

车桥耦合作用对输入到车辆的能量的影响分析如下:在地震动 RSN158 作用下可以采用由式(7)给出的线弹性单元模拟车辆和桥梁的水平接触,车辆的动平衡方程可以改写成如下形式:

$$\begin{cases} \ddot{u}_{2x} + \dfrac{k_{2x}}{m_{\mathrm{v}}} u_{2x} = \left(-1 + R_x\right)\ddot{u}_{gx}, \\ \ddot{u}_{2y} + \dfrac{k_{2y}}{m_{\mathrm{v}}} u_{2y} = \left(-1 + R_y\right)\ddot{u}_{gy} \end{cases} \tag{12}$$

式中:R_x 和 R_y 为桥梁振动影响系数,由桥梁的位移响应 u_{1x} 和 u_{1y} 决定.

桥梁的弹性位移响应 u_{1x} 和 u_{1y} 可通过加速度反应谱进行估算.对于平滑的设计加速度反应谱,其最大值一般取有效地震动加速度峰值的 2.25 倍[23-24].假设地震动加速度有效峰值与地震动加速度最大值相等,则可以得到[16]:

$$\begin{cases} u_{1x} = 2.25 \times \dfrac{1}{\omega_{1x}^2}\ddot{u}_{gx} = 2.25 \times \dfrac{m_{1x}}{k_{1x}}\ddot{u}_{gx}, \\ u_{1y} = 2.25 \times \dfrac{1}{\omega_{1y}^2}\ddot{u}_{gy} = 2.25 \times \dfrac{m_{1y}}{k_{1y}}\ddot{u}_{gy} \end{cases} \tag{13}$$

因此:

$$\begin{cases} R_x = 2.25 \times \dfrac{k_{2x}}{k_{1x}}\dfrac{m_{1x}}{m_{\mathrm{v}}}, \\ R_y = 2.25 \times \dfrac{k_{2y}}{k_{1y}}\dfrac{m_{1y}}{m_{\mathrm{v}}} \end{cases} \tag{14}$$

桥梁振动影响系数 R_x 和 R_y 随车辆质量的变化关系如图 9 所示.可以看出随着车辆质量的增加,桥梁振动对车辆水平地震响应的影响逐渐减小.当车辆质量 $m_{\mathrm{v}} \leqslant 30 \times 10^3$ kg 时,桥梁振动对车辆的影响与地震动的影响处于同一量级.在车辆质量 $m_{\mathrm{v}} = 30 \times 10^3$ kg 时,桥梁振动影响系数 R_y 仅为 0.07,相对于地震动的影响完全可以忽略.

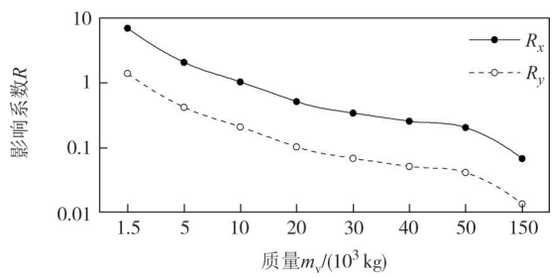


图 9　桥梁振动影响系数 R_x 和 R_y 随车辆质量的变化关系

Fig.9　Variation of influence factors R_x and R_y of bridge vibration with vehicle mass

在竖向,如图 10 所示,输入到车辆中的能量主要来自于桥面振动,而来自于地震动的能量输入可以忽略不计.

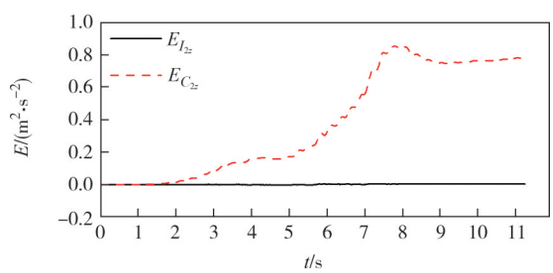


图 10　地震动 RSN158 作用下在竖向输入到车辆的能量

Fig.10　Vertical input energy from ground motion RSN158 to the vehicle

4　结 论

由于地震动谱特性丰富,采用调谐质量阻尼器原理解释车辆和公路桥梁地震耦合作用的机理并不十分合理.因此,本文采用能量法分析了地震作用下车辆和公路桥梁的地震耦合作用机理.

在地震作用下,车桥耦合系统中的桥梁会受到由地震动和车辆振动产生的激励作用;车辆则受到地震动和桥面振动产生的激励作用.在水平方向上,输入到桥梁中的能量主要来自地震动,车辆振动产生的能量输入可以忽略不计.而在竖向,由于车桥耦合作用,由地震动和车辆振动输入到桥梁中的能量之和可能会小于仅考虑桥梁时由地震动产生的能量输入,使桥梁的竖向地震响应减小.

在水平方向,车辆质量越小,桥梁振动产生的对车辆的能量输入越大;在竖向,输入到车辆中的能量

主要来自桥面振动.随着车辆质量的增加,桥梁振动对车辆水平地震响应的影响逐渐减小.当车辆以弹性振动为主时,输入到车辆中的能量主要来自地震动,桥梁振动产生的能量输入可以忽略不计.

参考文献

[1] 公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01-2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
Specifications for seismic design of highway bridges:JTG/T 2231-01-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2020.(in Chinese)

[2] Design specifications for highway bridges-Part V: seismic design [S]. Japan Road Association, 2012.

[3] 城市桥梁抗震设计规范:CJJ 166—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Code for seismic design of urban bridges : CJJ 166—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.(in Chinese)

[4] 国家统计局.民用汽车拥有量(万辆)[EB/OL].(2021-05-28)[2023-04-11]. https://data. stats. gov. cn/easyquery. htm? cn=C01&zb=A0G0I&sj=2020.
National bureau of statistics. Number of civilian cars owned (in 10 000 s)(2021-05-28)[2023-04-11].https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm? cn=C01&zb=A0G0I&sj=2020.(in Chinese)

[5] 百度地图.2020年度中国城市交通报告[DB/OL].(2021-01-20)[2023-04-11]. https://jiaotong.baidu.com/cms/reports/traffic/2020annualtrafficreport/index.html.
Baidu maps. 2020 annual China urban transportation report [DB/OL].(2021-01-20)[2023-04-11]. https://jiaotong.baidu.com/cms/reports/traffic/2020annualtrafficreport/index.html.(in Chinese)

[6] AASHTO Guide specifications for LRFD seismic bridge design [S]. 2nd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.

[7] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 2: Bridges[S]. European Committee for Standardization, 2005.

[8] YENP W H P, CHEN G, BUCKLE I, et al. Postearthquake reconnaissance report on transportation infrastructure impact of the February 27, 2010, offshore Maule earthquake in Chile[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2011.

[9] SUGIYAMA I, KAMEDA H, SASAKI N, et al. Dynamic structure-vehicle interaction of highway bridges and its implication to seismic design [C]//Proceedings of the 6th U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop. Lake Tahoe NV, 1990.

[10] KAMEDA H, MURONO Y, MAEKAWA Y, et al. Dynamic structure-vehicle interaction for seismic load evaluation of highway bridges [C]//Earthquake Engineering, Tenth World Conference. Madrid Spain, 1992.

[11] WIBOWO H, SANFORD D M, BUCKLE I G, et al. The effect of live load on the seismic response of bridges[R]. Reno, NV,USA: University of Nevada, 2013 .

[12] WIBOWO H, SANFORD D M, BUCKLE I G, et al. Effects of live load on seismic response of bridges: a preliminary study[J]. Civil Engineering Dimension, 2012, 14(3):166-172.

[13] SHABAN N, CANER A, YAKUT A, et al. Vehicle effects on seismic response of a simple-span bridge during shake tests[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44: 889-905.

[14] ZHOU Y, CHEN S. Dynamic simulation of a long-span bridge-traffic system subjected to combined service and extreme loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141 (9): 04014215.

[15] CUI C, XU Y. Mechanism study of vehicle-bridge dynamic interaction under earthquake ground motion [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2021, 50: 1931-1947.

[16] CHOPRA A K. Dynamics of structures[M]. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012.

[17] PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center). Ground motion database[DB/OL].(2020-01-30)[2023-04-11]. https://ngawest2.berkeley.edu.

[18] KENNEY J F, KEEPING E S. Mathematics of statistics[M]. 3rd ed. New York: D. Van Nostrand Company Inc., 1954.

[19] HOUSNER G W. Earthquake resistant design based on dynamic properties of earthquakes[J]. Journal Proceedings, 1956,53(7): 85-98.

[20] UANG C, BERTERO V V. Evaluation of seismic energy in structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19: 77-90.

[21] UANG C-M, BERTERO V V. Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design [R]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California,1988: 4-9.

[22] YE L P, SHUNSUKE O. Maximum seismic displacement of inelastic systems based on energy concept [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(12): 1483-1499.

[23] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].2016年版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Version 2016. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.(in Chinese).

[24] Applied technology council. Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings[M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1978.