

竖向地震引起的城市高架桥的车-桥耦合作用

徐艳¹, 施文¹, 林国才¹, 崔存玉^{1,2}

(1. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 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: 建立了典型城市高架桥的车-桥耦合作用简化模型, 利用非线性接触单元模拟桥面和车辆之间的耦合, 并选取不同频谱特性的竖向地震动作为激励, 研究汽车质量、频率、地震动频谱特性和峰值加速度等多个参数对车-桥耦合系统动力响应的影响。结果表明, 车辆质量和车辆振动频率以及地震动频谱特性均对车桥耦合系统有较大的影响, 在共计 1 866 个工况中有 221 个工况出现了车桥分离的现象; 车桥分离对桥梁竖向位移响应多表现为不利, 同时还大幅增加了车辆对桥面的碰撞力; 在统计意义上, 车桥分离的峰值加速度的平均值随着汽车质量的增加而增加, 随着汽车频率的增加而减小, 随着地震动平均周期的增大而减小。

关键词: 地震; 车桥耦合; 非线性接触; 动力响应; 高架桥

中图分类号: U447

文献标志码: A

Vertical Earthquake Shaking Induced Vehicle-Bridge Coupling Behavior of Urban Viaducts

XU Yan¹, SHI Wen¹, LIN Guocai¹, CUI Cunyu^{1,2}

(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: This paper established a simplified vehicle-bridge coupling model of urban viaduct via nonlinear contact element to simulate the contact relationship between vehicle tires and bridge deck, and to investigate the influence of vehicle mass, frequency, ground motion spectrum characteristics and peak acceleration on the dynamic response of vehicle-bridge system subjected to selected vertical ground motions with wide-range of spectral characteristics. The results show that the vehicle mass, vehicle vibration frequency, and ground motion spectrum have a great influence on the vehicle bridge coupling system. The vehicle bridge separation phenomenon occurs in 221 of 1 866 cases. Vehicle bridge

separation is unfavorable to the displacement response of the bridge in most cases, and also greatly increases the impact force on the bridge deck. Statistically, the average value of peak acceleration of vehicle bridge separation increases with the increase of vehicle mass, decreases with the increase of vehicle frequency, and decreases with the increase of average period of ground motion.

Keywords: earthquake; vehicle bridge interaction; nonlinear contact; dynamic response; urban viaduct

城市桥梁的车辆荷载多以家用小轿车为主, 在分布上具有随机性。考虑到地震发生的概率小、持续时间短, 我国现行的《城市桥梁抗震设计规范》^[1] 规定, 进行城市桥梁抗震设计时不需要考虑地震作用与活载的组合, 仅对于城市轨道交通桥梁规定在横桥向需要计入 50% 活载引起的地震力。但在近年来的桥梁震害中, 由于汽车与桥面脱离、翻转和碰撞加重桥梁损毁的现象并不鲜见, 严重影响了桥梁的使用功能^[2-3]。相比铁路桥梁和轨道交通桥梁, 对地震引起的城市高架桥的车桥耦合作用研究较少, 因为与桥梁的自重相比, 汽车荷载可以忽略不计。但如果考虑到地震发生在城市交通的高峰期, 或由于交通限流而引起的大量汽车拥堵在城市立交各个出口的情况, 此时的汽车荷载的总量相比于跨径在 20~60 m、结构形式为简支或连续的匝道桥^[4] 已不可忽略。实际上, 美国和欧洲的相应规范^[5-6] 针对特定的桥梁, 分别给出了一个小于 0.5 和 0.2 的活载组合系数, 而在既有的研究中, 汽车活荷载对桥梁地震响应的影响仍然不够明确。Kim 等^[7] 采用三维动力反应分析方法, 探讨了高架桥在移动汽车荷载和静止汽车荷载作用下车-桥相互作用下的地震反应, 认为在数值计算中考虑接近实际情况的车辆动力系统时城市高架的地震反应与不考虑车辆荷载相比减小

收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51938013, 51878492)

第一作者: 徐艳, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: yanxu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

了,即车辆会减小桥梁的地震响应,同时计算结果表明,对于移动车辆与静止车辆,它们对桥梁地震响应和主频特性的影响相似。Shaban等^[8]对一座长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,发现车辆对桥面板横向加速度响应的减小达15.1%,作者认为造成这一现象的原因是车辆的出现显著增加了车桥系统的阻尼。Wibowo等^[9]通过振动台试验进行了静止车辆对连续曲线梁桥地震响应影响的研究,并进行了参数分析。试验结果表明,当地震幅值较小时车辆会减小桥梁下部结构地震响应,随着地震幅值的增加,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通常增加10%~15%。Cui等^[10]建立了地震作用下三跨连续梁的车桥耦合数值模型,并通过能量分配对地震作用下的车桥耦合振动进行了机理分析,结果表明,虽然在统计意义上,车辆对桥梁地震响应的影响在大约85%的情况下不会超过5%,但在某些特定的情况下,最不利的影响可以达到30%。唐基凯^[11]以简支梁为研究对象,基于哈密顿原理建立了地震激励下车桥耦合系统方程,作者指出,当不考虑主梁开裂时,桥梁位移响应随行车速度的增加而减小;如果考虑主梁开裂

后桥梁位移响应随行车速度的增加而增大,并且车桥质量的比值越大桥梁位移响应也越大。可见,片面地认为汽车荷载会作为额外的质量-阻尼系统从而降低桥梁的地震响应是不够安全的。为了进一步明确汽车荷载对城市高架桥地震响应的影响,需要综合考虑地震激励的强度、车辆-桥梁质量的比值、频率的比值等参数的影响

本文首先建立典型城市高架桥的车-桥耦合作用简化模型,利用非线性接触单元模拟桥梁和车辆之间的动力耦合作用,分析包括汽车质量、频率、地震动频谱特性和峰值加速度在内的多个参数对车-桥耦合系统动力响应的影响。

1 车桥耦合作用模型的建立

已有研究表明,地震作用下的轨道交通桥梁动力分析模型包括车辆、轨道、桥梁、轮轨关系和桥轨关系模型^[12],典型的列车模型由车身、转向架、轮对、轴箱和悬挂系统组成,如图1a所示;而城市桥梁的动力分析模型则需要考虑车辆、桥梁和体现车轮与路面接触的模型,其中汽车由刚性底盘(车身)、悬架、轮胎等元件组成^[13],如图1b所示。

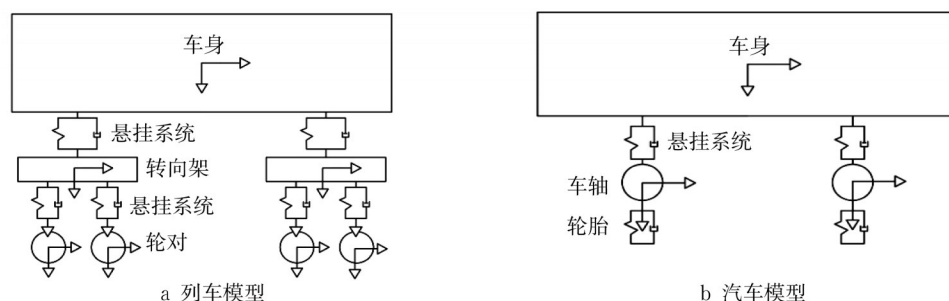


图1 车辆模型

Fig. 1 Vehicle model

对于铁路桥梁,为了研究列车的动力特性以保证列车的行驶安全,铁路列车的建模往往较为细致^[14]。公路桥梁车桥耦合的研究中根据不同的研究目的,通常把车辆假设或简化处理为匀速移动常量力、匀速移动简谐力、匀速滚动的质量、匀速移动的弹簧-质量、半车模型和整车模型等^[15]各种情况。但考虑地震作用后,更简洁的汽车模型能减少车桥耦合系统的自由度并显著降低瞬态动力耦合方程组的复杂程度,有助于接触-碰撞等强非线性方程的计算收敛。严格意义上,铁路桥梁与公路、城市桥梁均需考虑除地震激励外由轨道或桥面不平顺引起的附加

激励,但考虑到汽车的行驶具有较大的随机性,已有研究指出在地震发生时大约一半的司机会选择停车^[16],并且城市桥梁的交通拥堵时长远远大于地震波的激励时间。因此,本文的研究假设汽车车辆静止于桥面,并忽略桥面不平整的影响。

地震作用下,车辆与桥梁结构的相互作用是一个复杂的动力学问题。车辆子系统与桥梁子系统作为组成车桥耦合系统的两个子系统,二者之间通过一定的接触关系相互影响,只有建立车桥耦合系统的整体运动方程来同步求解,才能得到其最终的动力响应。因此,在地震引起的车桥耦合系统的动力

分析中,车辆模型的建立、桥梁模型的建立和接触关系的处理是三大关键问题。

1.1 车辆模型

如前所述,更简化的车辆模型能够为复杂的动力耦合方程的强迫振动求解带来便利。由于本文仅考虑静止车辆与桥梁竖直方向上的耦合作用,因此选取了图2所示的具有两自由度的四分之一车辆模型^[15]对车辆进行近似模拟。

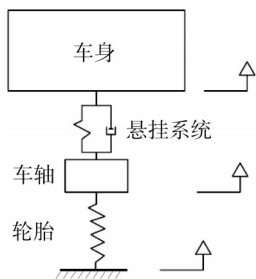


图2 四分之一车辆模型

Fig. 2 Quarter-car model

文献[17]指出,车辆在竖直方向的阻尼比一般为0.3,频率为1.0~3.0 Hz,因此车辆的刚度与阻尼可以在已知汽车质量下由动力学基本方程求得,本文考虑如表1所示的1种轿车和3种不同吨位的卡车的情况。

1.2 接触单元

轨道交通桥梁的轮轨接触模型分为假定轮对与轨道在竖直方向上不分离的密贴接触模型和以Hertz接触为基础的模型^[18]。前者不能考虑车桥分离,对于本文的研究不适用;后者为本文考虑车桥分离的计算带来了可能。

作为与桥梁结构直接作用的车辆荷载,在其通过桥梁时,由于路面不平整等因素使得车辆对桥梁的压力和动、静摩擦力随时间不断改变,从而引起桥梁结构的振动,而桥梁结构的振动又会反过来影响车辆的行驶,形成公路车辆与桥梁间的耦合振动。车辆和桥梁间的相互作用受到桥梁结构的动力特性(桥跨结构形式、质量与刚度分布、材料阻尼等),车辆的动力特性(车型、自振频率、阻尼等),桥头引道和桥面的平整状态,桥头沉陷及伸缩缝装置的状况等因素的影响。因此,车桥耦合动力系统中,车辆与桥梁间的相互作用是通过轮胎与桥面接触实现的。但通常意义上的公路桥梁的车桥耦合系统中(即非地震引起的)对车轮与路面接触关系的模拟多为线弹性模型^[19-20],导致其无法模拟地震作用下车辆与桥面分离—碰撞—再分离的过程。文献[21]指出,轮

胎与桥梁间的水平接触力由一系列受竖向力影响的方程组确定,而根据Hertz定律^[22],轮胎与桥面间竖向力与水平向受力无关;文献[10]的研究也表明,轮胎与桥梁间的水平接触力对桥梁的影响很小。因此,本文忽略车桥间水平向的接触关系,仅在竖向采用Hertz模型来模拟车辆随着地震激励的频谱或幅值大小的不同,与桥面之间产生分离—碰撞—再分离的非线性动态过程。

根据Hertz定律^[22],一个半径为 R 的球体在一个弹性半空间上压出的凹痕深度为 d ,产生的接触区域的半径为 $a=\sqrt{Rd}$,如图3所示。

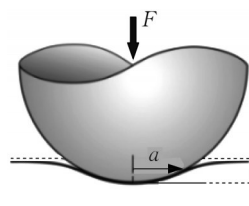


图3 球体和弹性半空间接触

Fig. 3 Contact between sphere and elastic half space

接触作用力 F 可由下式计算:

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

式中: E^* 为等效弹性模量; E_1 、 E_2 为接触体弹性模量; ν 为接触体泊松比。

1.3 桥梁模型

本文选取一仅考虑主梁的单车道20 m简支梁城市高架桥为工程背景,单位长度质量为 $2\ 653\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$,等效刚度为 $18\ 000\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$,等效质量^[23]为 $26\ 530\ \text{kg}$,阻尼比为5%,属于规范^[1]所定义的规则桥梁。根据规范给出的规则桥梁抗震分析方法建立桥梁的单质点模型,其相关动力学参数如表1所示。

表1 汽车与桥梁的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of vehicles and bridges

类别	M/kg	R/m	$\xi/\%$	f/Hz
桥梁	53 060		5	4.1
轿车1	1 500	0.3	30	1.0/2.0/3.0/4.1/4.5
卡车2	15 000	0.3	30	1.0/2.0/3.0/4.1/4.5
卡车3	30 000	0.3	30	1.0/2.0/3.0/4.1/4.5
卡车4	50 000	0.3	30	1.0/2.0/3.0/4.1/4.5

值得一提的是,文献[24]指出在冲击持续时间的前半部分,较高的模态对计算等效质量和等效刚

度有很大贡献但在后半程贡献不大,并且高阶振型对冲击力的计算几乎没有影响。基于此,在本文的分析中,认为对于地震激励下的车桥耦合动力系统,可以合理地忽略桥梁高阶模态的贡献,仅考虑一阶振型的影响,最终建立的地震引起的车桥耦合系统的简化模型如图4所示。

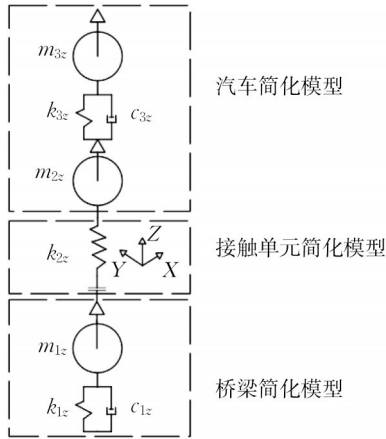


图4 简化车桥相互作用系统模型

Fig. 4 Simplified model of vehicle-bridge interaction system

2 车桥耦合系统动力方程的建立

2.1 系统控制方程的建立

针对图4所示的简化车桥耦合系统,根据达朗贝尔原理,可以建立如式(3)所示系统控制方程。

$$\begin{cases} -m_{1z}\ddot{u}_{gz} = m_{1z}\ddot{u}_{1z} + c_{1z}\dot{u}_{1z} + k_{1z}(u_{1z} + \delta_{1z}) + F_{2z} + m_{1z}g \\ -m_{2z}\ddot{u}_{gz}\Delta = m_{2z}\ddot{u}_{2z} + c_{3z}(\dot{u}_{2z} - \dot{u}_{3z}) + k_{3z}(u_{2z} + \delta_{2z} - u_{3z} - \delta_{3z}) - F_{2z} + m_{2z}g \\ -m_{3z}\ddot{u}_{gz}\Delta = m_{3z}\ddot{u}_{3z} + c_{3z}(\dot{u}_{3z} - \dot{u}_{2z}) + k_{3z}(u_{3z} + \delta_{3z} - u_{2z} - \delta_{2z}) + m_{3z}g \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为桥梁、汽车质量,下标1代表桥梁,2代表汽车底盘和轮胎,3代表车身,下同; c 为桥梁、汽车阻尼; k 为桥梁、汽车等效刚度; F 为接触单元内力; δ 、 u 分别为桥梁、汽车静位移和动位移; Δ 为分离判断系数。

其中桥梁和汽车的静位移由方程组(4)确定。

$$\begin{cases} \delta_{1z} = -(m_{1z} + m_{2z} + m_{3z})g/k_{1z} \\ \delta_{2z} = \delta_{1z} - [(m_{2z} + m_{3z})g/k_{2z}]^{2/3} \\ \delta_{3z} = \delta_{2z} - m_{3z}g/k_{3z} \end{cases} \quad (4)$$

接触单元(即轮胎内力)由方程(5)确。

$$F_{2z} = k_{2z}(u_{1z} + \delta_{1z} - u_{2z} - \delta_{2z})^{3/2}\Delta \quad (5)$$

为了模拟车辆与桥梁的竖向分离与碰撞,引入分离判断系数 Δ ,由方程组(6)确定。

$$\Delta = \begin{cases} 0 & u_{1z} + \delta_{1z} < u_{2z} + \delta_{2z} \\ 1 & u_{1z} + \delta_{1z} \geq u_{2z} + \delta_{2z} \end{cases} \quad (6)$$

由分离判断系数可知,当桥梁总位移小于汽车总位移时即认为发生车桥分离,当桥梁总位移大于等于汽车总位移时,认为桥梁与汽车轮胎有挤压,即二者存在相互作用力。

接触单元刚度系数 k_{2z} 可由式(1)、(2)和(5)推导得到,单位为 $N \cdot m^{-2/3}$ 。

$$k_{2z} = \frac{4}{3}R^{1/2} \left/ \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right. \quad (7)$$

2.2 地震动的选取

针对本文的研究目的,地震动选取自太平洋地震工程研究中心地震动数据库(PEER Ground Motion Database)中震级为6.0~7.6级,地震动竖向分量的平均周期为0.12~1.42 s,竖向峰值加速度(PGA)为0.07~1.89 g的地震记录,如表2所示。平均周期(T_m)可以根据地震动时程曲线的傅里叶谱通过公式计算得到^[25],这一参数可以简便地用来描述地震动的频谱特性,反映了在一定范围内地震动周期的平均值^[26]。

表2 地震动选取

Tab. 2 Selection of ground motion

序号	地震动编号	震级	年份	PGA/g	T_m/s
1	RSN159	6.5	1979	0.47	0.12
2	RSN126	6.8	1976	1.70	0.14
3	RSN181	6.5	1979	1.89	0.16
4	RSN4066	6.0	2004	0.22	0.20
5	RSN1084	6.7	1994	0.61	0.23
6	RSN180	6.5	1979	0.59	0.27
7	RSN1085	6.7	1994	0.48	0.28
8	RSN182	6.5	1979	0.58	0.36
9	RSN1511	7.6	1999	0.28	0.64
10	RSN1481	7.6	1999	0.07	1.42

3 地震作用下车桥耦合系统动力响应

将每条地震动的PGA从0.1g按一定的增幅进行增量动态分析,输入到表1所示的不同汽车质量、汽车频率组合的车桥耦合系统作为外部激励,运用Cash等^[27]提出的变阶变步长的显式龙格-库塔法对系统方程进行求解,共计1 866种工况。

3.1 车桥竖向分离

运用 Vamvatsikos 等^[28-29]提出的 Hunt & Fill 算法对车桥分离 PGA 值进行搜索和精确定位,统计发现共 221 个工况出现车桥分离,有 15 个工况在 PGA 不大于原始地震动 PGA 时便出现了车桥的竖向分离现象,如图 5 所示。

图 5 中每一个点都代表某一工况(汽车质量和

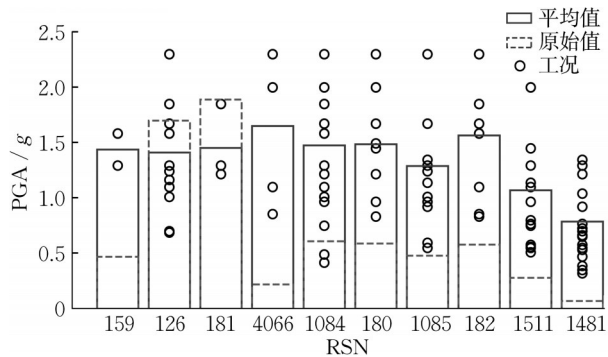


图 5 车桥初始分离 PGA 与原始地震动 PGA 的分布

Fig. 5 Distribution of vehicle initial detachment PGA and original ground motion PGA

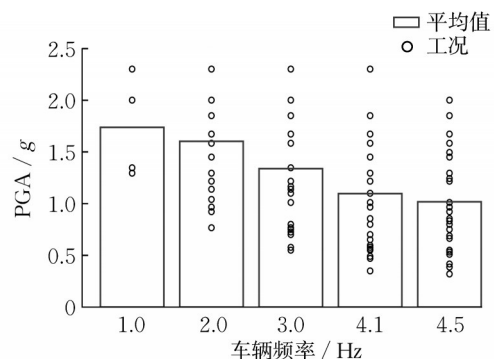
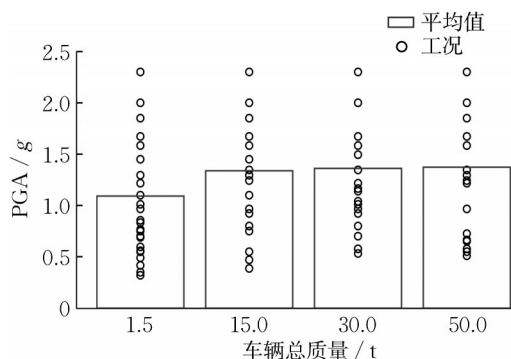


图 6 车桥分离 PGA 与车辆质量和频率的关系

Fig. 6 Relationship between vehicle initial detachment PGA and vehicle mass and frequency

由图 6 可见,在统计意义上,车桥分离的 PGA 平均值大致随着汽车质量的增加而增加,随着汽车频率的增加而减小。

3.2 桥梁响应

经统计,当考虑汽车作用时,1 866 个工况中 45.6% 的工况的桥梁最大动位移有所增加,54.4% 的桥梁最大动位移有所减少。各地震动作用下桥梁位移增量的平均值如图 7 所示,可见车辆对小跨径梁桥动力响应的有利有弊,但不利的位移增量更大。其中,在 RSN1084 原始地震动作用下,当汽车质量为 50 t(车桥质量比 0.94),汽车频率为 1.0 Hz(车桥频率比 0.24)时桥梁最大负方向竖向位移为 7.4 mm,相比不考虑车辆时的最大位移 16.6 mm

汽车频率的组合)在该地震动下初始发生车桥分离的 PGA 值;虚线柱形图代表的是原始地震动的 PGA 值,实线柱形图代表的是在通过对该地震动进行增量动力分析(IDA)得到的发生车桥分离的所有工况的 PGA 平均值。由图 5 可见,大部分地震动作用下发生车桥分离现象的 PGA 都大于原始的地震动的 PGA,但对于如 RSN126、RSN181 和 RSN1084 这些地震记录就出现了相反的情况,也就意味着在实际地震动作用下,车桥分离现象会发生。另一个值得注意的现象是,RSN181 是所有地震动中竖向 PGA 最大的(1.89g),却仅有 3 个工况发生了车桥分离,而 RSN1084 竖向 PGA 仅有 0.61g,却也有 2 个工况较早地(比原始地震动小)发生了车桥分离,这说明车桥分离的现象与地震动的 PGA 并不线性相关,地震动的频谱特性起着关键的作用。统计分析表明,车桥分离的 PGA 平均值大致随地震动平均周期增大而减小。

对上述结果按照车辆质量(m_v)和车辆频率(f_{vc})分组,得到如图 6 所示的分布图。

减少了 55%,起到了有利的作用;相反地,在 RSN1511 原始地震动作用下,汽车质量同为 50 t 但频率比接近 1.1(4.5 Hz)时,桥梁最大负方向竖向动位移为 20.3 mm,比不考虑车辆时桥梁的最大竖向动位移 4.7 mm 增加了 332%,起到了不利的作用。

值得一提的是,文献[10]中由于车桥质量的比值较小,仅有少数工况下车辆对桥梁的最不利影响达到 30%。如图 7 所示,对本文中的小跨径简支梁桥而言,由于车桥质量比的增加,这一影响会显著增加,这也从另一个方面说明了中小跨径的桥梁更应该考虑地震引起得车桥耦合作用。通过分析可知,产生这一现象的原因可以通过系统控制方程(3)进行解释:桥梁子系统的动力方程可以看作受地震激

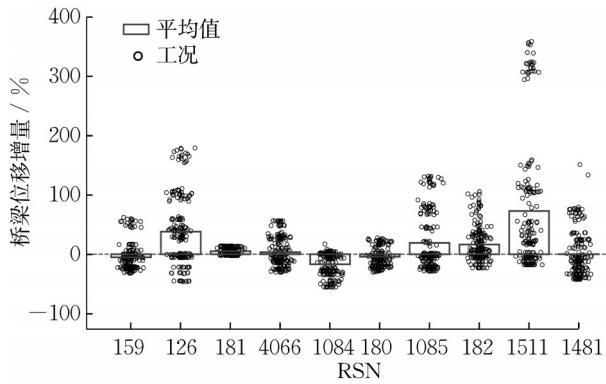


图7 桥梁最大位移增量分布
Fig. 7 Distribution of maximum bridge displacement increment

励和车桥相互作用力 F_{2z} 的受迫振动,当 F_{2z} 值较大时,桥梁的振动周期会接近于 F_{2z} 的周期,如图8所示。

因此,车桥相互作用对桥梁地震响应的影响,可

以看作一方面汽车作为质量-弹簧-阻尼参与到系统共同承担了地震动的能量,从而减小桥梁的动力响应(Kim等^[7]的研究也得到了类似的结论);另一方面,汽车与桥梁的相互作用力 F_{2z} 会改变系统的周期,从而影响桥梁的动力响应。在本例中,桥梁竖向的振动周期明显增长(从原来的0.24 s增加到0.71 s),这造成了桥梁位移响应的大幅增加。

由此可见,车辆对桥梁响应最终的影响需要综合考虑汽车质量、频率、阻尼比和地震动频谱特性等因素。统计分析(图9)表明,对该20 m简支桥梁,车桥质量比小于0.28时桥梁竖向最大动位移总体上有所减小(图中表现为桥梁位移增长率平均值为负值);当车桥质量比大于0.56时,总体上会增大桥梁竖向最大动位移(图中表现为桥梁位移增长率平均值为正值);当车桥频率比小于0.49时,桥梁竖向最大动位移总体上有所减小;当车桥频率比大于0.73时,总体上会增大桥梁竖向最大动位移。

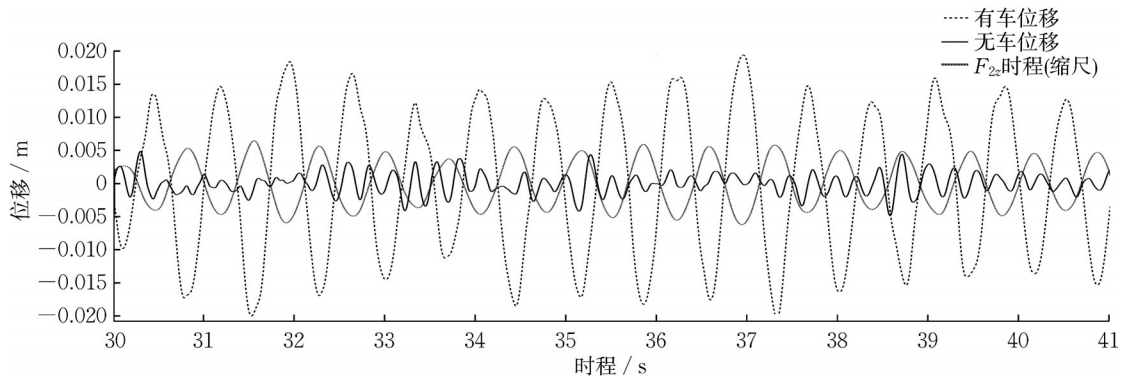


图8 RSN1511有车、无车时桥梁动位移时程
Fig. 8 Dynamic displacement time history of bridge with and without vehicles when subject to RSN1511

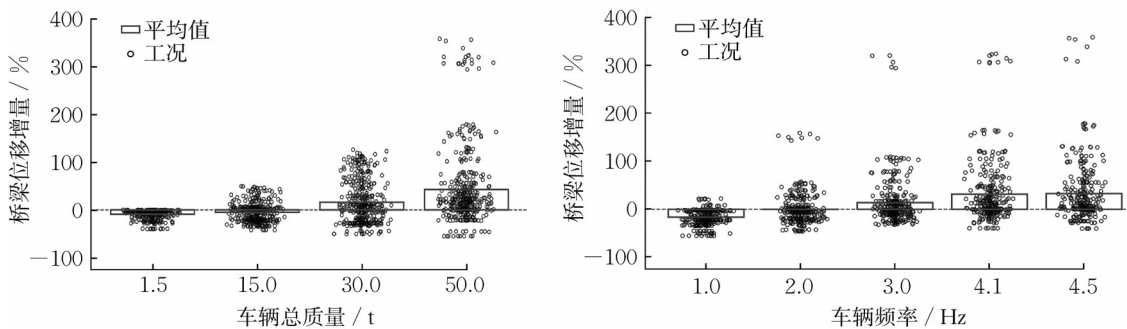


图9 桥梁位移增长率与车辆质量和频率的关系(未发生车桥分离)
Fig. 9 Relationship between bridge displacement increment rate and vehicle mass and frequency (without separation)

此外,不同质量和频率的汽车在车桥分离时对桥梁位移响应的影响也有类似的规律,如图10所示。显然,若车辆质量和频率同时大于相应比值,将

会对桥梁竖向地震响应产生显著的放大效应,如图7中RSN1511的计算结果。

统计分析表明,在RSN159、RSN181、RSN4066

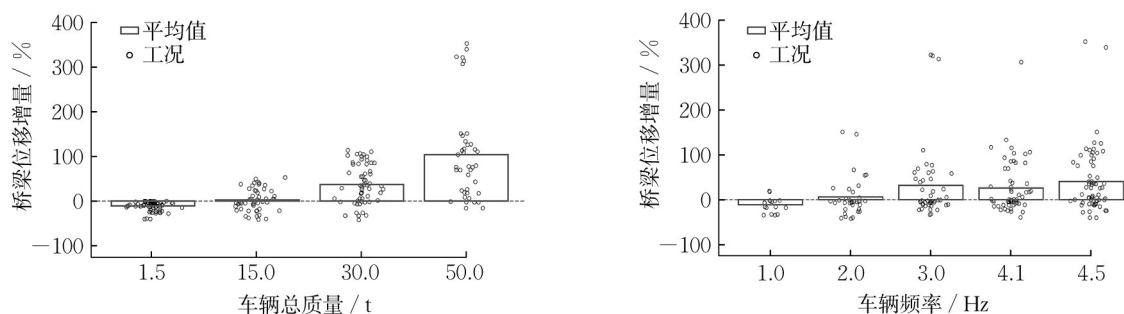


图10 桥梁位移增长率与车辆质量和频率的关系(车桥发生分离)

Fig. 10 Relationship between bridge displacement increment rate and vehicle mass and frequency (with separation)

这3条地震动作用下,车桥发生分离的桥梁位移增量的平均值小于车桥不发生分离的,这是因为在这3条地震动作用下仅有少数1.5 t(车桥质量比0.03)的汽车发生了分离。由图10可知,1.5 t汽车的车桥分离几乎都减小了桥梁响应,因此会比车桥持续接触的工况更利于桥梁的动力响应。在其余7条地震动作用下,车桥发生分离的工况的桥梁位移增量平均值均大于车桥不发生分离的工况,如图11所示,即车桥分离相比较车桥持续接触更不利于桥梁的动力响应,考虑到地震动和车流的随机性,总体来看车桥分离对桥梁的地震响应更趋于不利。

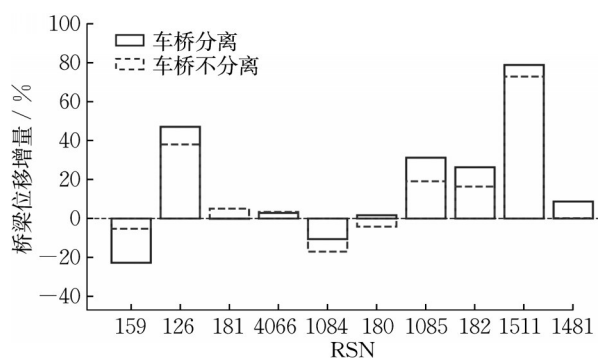


图11 车桥分离对桥梁响应(平均值)的影响

Fig. 11 Effect of detachment on bridge response (average)

3.3 车桥竖向接触力

车桥分离不仅对桥梁位移响应多表现为不利,而且会大幅增加车桥竖向接触力(分离后再接触时即为碰撞力),与车桥不分离相比,竖向接触力的均值都超过了2倍的车辆自重(G),如图12所示。

其中,RSN1481地震动在PGA为0.8g,汽车质量为50 t(车桥质量比0.94)、频率为4.5 Hz(车桥频率比1.1)时,车桥耦合系统在45~50 s内共出现6次车桥分离和碰撞现象,如图13所示,并且在45~46 s

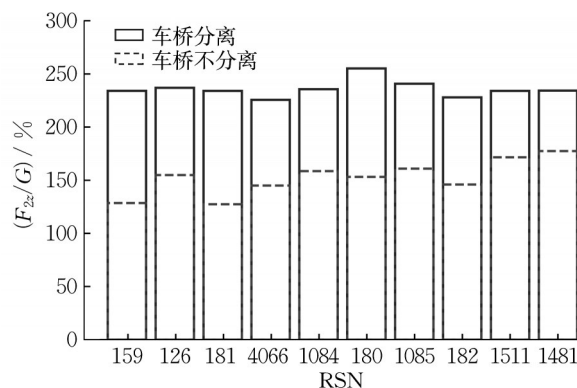


图12 车桥分离对车桥最大相互作用力(均值)的影响

Fig. 12 Influence of maximum interaction force by vehicle detachment (average value)

间出现了最大的碰撞力1 723 kN,约为汽车重力的3.5倍。而RSN180在PGA为1.35g,汽车质量、频率分别为15 t(车桥质量比0.28)、4.5 Hz(车桥频率比1.1)时,车桥没有发生分离,此时的接触力最大值仅为480 kN,不超过50 t卡车的自重。

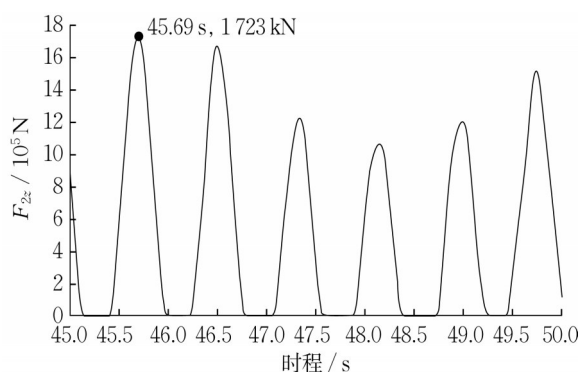


图13 RSN1481-0.8g-50 t-4.5 Hz接触力时程

Fig. 13 Contact force time history of RSN1481-0.8g-50 t-4.5 Hz

根据图6的分析,大质量和低频率的汽车均不容易发生车桥分离,因此不容易引起较大的车桥竖

向接触力增量,而小质量和高频率的汽车容易发生车桥分离,带来较大的竖向接触力增量,图14也印证了该结论。其中,由于汽车自重不同,为了便于分

析,这里使用了相互作用力幅值与自重的比值进行分析比较。

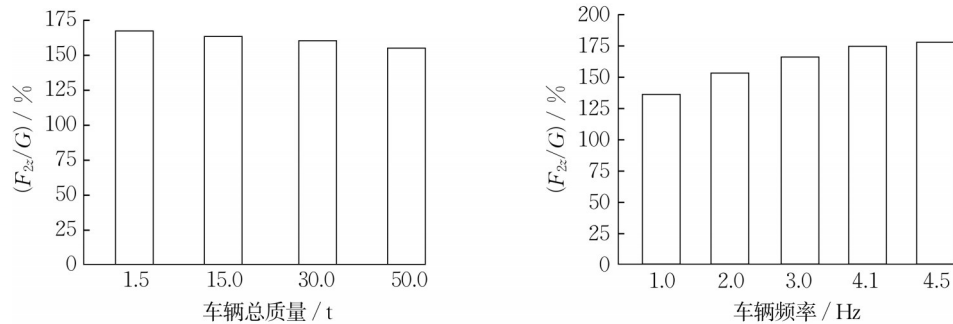


图14 车桥最大相互作用力(均值)与车辆质量和频率的关系

Fig. 14 Relationship between maximum interaction force (average value) and vehicle mass and frequency

4 结论

本文以一20 m简支梁城市高架桥为例,采用非线性接触单元模拟轮胎与路面的接触状态,建立简化的车桥耦合作用系统模型,研究了汽车质量、汽车频率、地震动频谱特性和幅值对地震引起的车桥耦合系统动力响应的影响。得到的结论如下:

(1)在实际地震动作用下,车桥可能产生分离—碰撞—再分离的现象。车桥分离的现象不仅与地震动的PGA有关,地震动的频谱特性也起着关键的作用。统计分析表明,车桥分离的PGA平均值大致随地震动平均周期增大而减小;但随着汽车质量的增加,在地震作用下车辆与桥梁越不容易发生分离;汽车频率越大,车桥系统越容易发生分离。车桥分离对桥梁位移响应多表现为不利,而且会大幅增加车桥竖向接触力。

(2)地震引起的车桥耦合作用对桥梁动力响应的影响可以看作汽车作为质量—弹簧—阻尼参与车桥耦合系统共同承担了地震动的能量,减小了桥梁的动力响应;同时,汽车与桥梁间的接触力会改变车桥系统的周期,从而影响桥梁的动力响应。

(3)统计分析表明,随着汽车质量的增加,桥梁的动力响应(竖向最大位移)一定程度上会增大,车桥的竖向最大接触力与汽车重力的比值会减小;而随着汽车频率的增加,桥梁的动力响应一定程度上会增大,车桥的竖向接触力与汽车重力的比值会增大。

作者贡献声明:

徐 艳:确定研究方向,撰写和修改文稿。
施 文:编制程序,数据处理,撰写和修改文稿。
林国才:指导程序编制,文献整理。
崔存玉:指导程序编制,文献整理。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of urban bridges: CJJ 166—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [2] YEN W H P, CHEN G, BUCKLE I, *et al.* Post-earthquake reconnaissance report on transportation infrastructure impact of the february 27, 2010, offshore maule earthquake in Chile [R/OL]. [2023-06-08]. <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/>.
- [3] FUJINO Y, SIRINGORINGO D M, ABE M. Japan's experience on long-span bridges monitoring [J]. *Structural Monitoring and Maintenance*, 2016,3(3):233.
- [4] 石雪飞,李国平,李建中.现代桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2021.
SHI Xuefei, LI Guoping, LI Jianzhong. *Modern bridge engineering*[M]. Beijing: China Communications Press, 2021.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide specifications for LRFD seismic bridge design [S]. 2nd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.
- [6] European Committee for Normalization. Eurocode 8-design of structures for earthquake resistance [S]. Brussels: European Committee for Normalization, 2005.
- [7] KIM C W, KAWATANI M, KONAKA S, *et al.* Seismic

- responses of a highway viaduct considering vehicles of design live load as dynamic system during moderate earthquakes [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011, 7(7/8): 523. DOI:10.1080/15732479.2010.493339.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] CUI Cunyu, XU Yan. Mechanism study of vehicle-bridge dynamic interaction under earthquake ground motion [J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2021, 50(7): 1931.
- [11] 唐基凯. 考虑外部激励的车桥耦合系统非线性动力响应分析 [D]. 长沙:长沙理工大学, 2019.
TANG Jikai. Nonlinearity dynamic analysis of vehicle-bridge coupling system with considering external excitation [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [12] 雷虎军, 李小珍. 车-轨-桥耦合系统中的非一致地震输入方法研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(4): 769.
LEI Hujun, LI Xiaozhen. Input methods of non-uniform seismic excitation in coupling system of vehicle-track-bridge [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(4): 769.
- [13] 薛军平, 刘习军. 车桥耦合振动影响因素与动力响应特性关系研究 [J]. *天津城建大学学报*, 2017, 23(3): 188.
XUE Junping, LIU Xijun. Study on the relationship between influence factors of vehicle-bridge coupling vibration and dynamical response [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2017, 23(3): 188.
- [14] 楼云锋, 时亚州, 陈荣, 等. 加固路基-列车耦合系统地震响应及安全性分析 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(14): 148.
LOU Yunfeng, SHI Yazhou, CHEN Rong, *et al.* Dynamic response and running safety evaluation of a strengthened embankment-train system during earthquake [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(14): 148.
- [15] 李小珍, 张黎明, 张洁. 公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势 [J]. *工程力学*, 2008, 25(3): 230.
LI Xiaozhen, ZHANG Liming, ZHANG Jie. State-of-the-art review and trend of studies on coupling vibration for vehicle and highway bridge system [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(3): 230.
- [16] KAWASHIMA K, SUGITA H, KANO H T. Effect of earthquake on driving of vehicle based on questionnaire survey [J]. *Structural Engineering/ Earthquake Engineering (Japan Society of Civil Engineers)*, 1989, 6: 405. DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.1989.410_235.
- [17] GILLESPIE T D. Fundamentals of vehicle dynamics [M]. [S. l.]: SAE International, 1992. DOI: 10.1289/ehp.1408989.
- [18] 杨静静, 张楠, 夏禾. 车轨耦合振动中4种轮轨竖向接触模型的适用性比较分析 [J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(6): 11.
YANG Jingjing, ZHANG Nan, XIA He. Comparative analysis on applicability of four wheel-rail vertical contact models for coupling vibration of vehicle-track system [J]. *China Railway Science*, 2016, 37(6): 11.
- [19] 陈水生, 赵辉, 李锦华, 等. 车桥耦合振动的非平稳桥面激励的模拟 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(5): 808.
CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, *et al.* Simulation of nonstationary bridge deck excitation of vehicle-bridge coupling vibration [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2020, 36(5): 808.
- [20] 陈水生, 赵辉, 夏钰桓. 车桥耦合振动的桥面非平稳随机激励模拟 [J]. *公路交通科技*, 2020, 37(8): 48.
CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, XIA Yuhuan. Simulation of nonstationary random excitation of bridge deck under vehicle-bridge coupling vibration [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(8): 48.
- [21] WEN Y K. Method for random vibration of hysteretic systems [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1976, 102(2): 249.
- [22] GOLDSMITH W. Impact: the theory and physical behavior of colliding solids [M]. New York: Dover Publications, 1960.
- [23] 同济大学, 浙江大学. 高等桥梁结构动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2022.
Tongji University, Zhejiang University. *Advanced structural dynamics of bridges* [M]. Beijing: China Communications Press, 2022.
- [24] CUI Cunyu, XU Yan, ZENG Zeng. Preliminary study of vehicle effect on vertical seismic responses of simply supported beam bridge [C/CD] // *International Bridge Conference*. [S. l.]: International Bridge Conference, 2019.
- [25] RATHJE E M, ABRAHAMSON N A, BRAY J D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(2): 150.
- [26] RATHJE E M, FARAJ F, RUSSELL S, *et al.* Empirical relationships for frequency content parameters of earthquake ground motions [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(1): 119. DOI: 10.1193/1.1643356.
- [27] CASH J R, KARP A H. A variable order runge-kutta method for initial value problems with rapidly varying right-hand sides [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 1990, 16(3): 201. DOI: 10.1145/79505.79507.
- [28] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31: 491. DOI: 10.1002/eqe.141.
- [29] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Applied incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2): 523.