

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240526001

# 多遇地震下无砟轨道多跨简支梁桥行车安全性研究\*

刘尊稳<sup>1,2</sup>, 李欣婧<sup>1</sup>, 邓永杰<sup>1</sup>, 李健宁<sup>1</sup>, 李浩帆<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**西部地区高速铁路桥上广泛采用的无砟轨道系统具有较大的纵向刚度,而地震区亦分布广泛,震时桥上行车无可避免,针对地震下高速铁路无砟轨道桥梁桥上列车行驶的安全性,以我国西部地区常见的高速铁路多跨CRTS II型板式无砟轨道32 m不规则简支梁桥为实际工程背景,基于WORKBENCH及SIMPACK平台建立车-线-桥一体化计算模型,研究震时不同行车速度下列车脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力的变化规律,并提出行车安全阈值。研究表明:列车行驶速度越快,地震强度愈强,列车脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力越大;考虑轨道约束作用可使列车的脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力平均分别降低7.19%、9.96%、7.97%,其中相差最大均约为15%;轨道系统的约束作用可提高行车安全阈值,若列车运行速度为350 km/h和300 km/h时,其可承受的地震峰值加速度分别增加了22.04%、36%,当地震峰值加速度为0.2g和0.3g时,列车可安全行驶的速度分别增大了7.24%、8.14%,行驶速度的影响更大,地震来临时,应减速慢行。无砟轨道系统的约束可有效提高桥上行车安全性,在设计计算时应考虑无砟轨道系统的约束效应。

**关键词:** 高速铁路桥梁; CRTS II型板式无砟轨道; 车-线-桥耦合振动; 地震激励; 行车速度; 行车安全性

**中图分类号:** U448.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0207-08

## Research on Train Operational Safety of Ballastless Track on Multi-Span Simply Supported Beam Bridges under Frequent Earthquakes

LIU Zunwen<sup>1,2</sup>, LI Xinjing<sup>1</sup>, DENG Yongjie<sup>1</sup>, LI Jianning<sup>1</sup>, LI Haofan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The ballastless track system, widely used on high-speed railway bridges in western China, has high longitudinal stiffness. Meanwhile, earthquake areas are widespread, and it is inevitable for trains to travel on bridges during earthquakes. This study focuses on train operational safety of ballastless track on bridges along high-speed railway under earthquakes. Using the CRTS II slab ballastless track on 32-meter irregular simply supported beam bridge commonly found in western China as a typical engineering example, an integrated vehicle-track-bridge computational model was established using the WORKBENCH and SIMPACK platforms. The study analyzed the variations in derailment co-

\* 收稿日期:2024-05-26;修回日期:2024-07-23

基金项目:甘肃省自然科学基金地震下高速铁路桥梁抗倒塌能力及列车运行安全性研究项目(21JR1RA240)资助

作者简介:刘尊稳(1985—),男,副教授,博士。主要从事无砟轨道铁路桥梁抗震研究。E-mail:liuzunwen@lztu.edu.cn

通信作者:李欣婧(1999—),女,硕士研究生。主要从事铁路桥梁抗震研究。E-mail:1143880744@qq.com

efficient, wheel load reduction rate, and wheelset lateral forces at different train speeds during earthquakes, and proposed safety thresholds for train operation. The results showed that as train speed and seismic intensity increased, the derailment coefficient, wheel load reduction rate, and wheelset lateral forces all increased. When the constraint effects of the track were considered, it could reduce the derailment coefficient, wheel load reduction rate, and wheelset lateral force of the train by an average of 7.19%, 9.96%, and 7.97%, respectively, with the maximum difference being about 15%. Additionally, the constraint effects of the track system could significantly enhance the safety thresholds for train operation. When the train ran at 350 km/h and 300 km/h, the maximum tolerable peak ground accelerations of the train increased by 22.04% and 36%, respectively. When the peak ground accelerations were 0.2g and 0.3g, the safe train speeds increased by 7.24% and 8.14%, respectively. It could be seen that the impact of train speed was more significant, indicating that the train should slow down when an earthquake occurred. The constraint of the ballastless track system can effectively improve the train operational safety on bridges, and the constraint effects should be considered in design calculations.

**Keywords:** high-speed railway bridge; CRTS II slab ballastless track; vehicle-track-bridge coupling vibration; seismic excitation; train speed; train operational safety

## 0 引言

迄今为止,我国高速铁路运营里程已达4.37万公里,大多采用“以桥代路”的建设模式,桥梁占比高达55%<sup>[1-2]</sup>。我国地处环太平洋地震带和亚欧地震带交汇处,地震活动频繁<sup>[3-4]</sup>,高速铁路无砟轨道桥梁建设覆盖西部地震断裂带,其高密度运行的列车无法避开震时桥上行车<sup>[5-6]</sup>,因此,研究地震下高速铁路无砟轨道桥梁桥上列车行车安全性具有现实意义。

国内外有关学者在地震下列车运行的安全性进行了大量研究,W.Gong等<sup>[7]</sup>结合ANSYS和MATLAB开发了列车-轨道-桥梁相互作用联合模拟方法,可用于研究结构系统在极端激励下的复杂非线性行为,为分析桥梁和列车的动力响应提供了一种行之有效的方法。H.Jiang等<sup>[8]</sup>以建立的八跨高速列车-CRTSⅢ型板式无砟轨道-桥梁系统的精细化耦合模型为基础,对近断层地震作用下高速列车安全运行速度进行了评估,并从扣件刚度和隔离层摩擦系数两方面进行了参数优化设计。S.Mohammad等<sup>[9]</sup>通过建立的土-桩-桥-车分析模型,对比研究有无隔震系统的单轨桥梁,发现常规铁路桥梁中的隔震系统的抗震能力要比单轨桥梁的强。韩艳等<sup>[10]</sup>基于建立的可考虑多点激励与行波效应的车-桥耦合模型进行了列车在不同地震作用下过桥的全过程仿真,探讨了地震波行波效应、列车运行速度及地震动强度对车辆走行性能的影响。杨勋等<sup>[11]</sup>通过研究隧道-列车系统地震作用下的动力响应,对地铁列车

运行的安全性进行了评估。楼云锋等<sup>[12]</sup>利用列车-路堤-土体耦合系统进行地震响应分析,对地基进行了加固,提高了行车安全性。雷虎军等<sup>[13]</sup>通过TTB-SAS程序建立的车-桥-轨仿真计算桥梁模型,研究了不同方向地震动对系统动力响应的影响,并得出横向地震动对行车安全性的影响最大。乔宏等<sup>[14]</sup>利用ANSYS建立的可以考虑局部条件的三维场地模型对车桥耦合系统进行了地震响应分析,揭示了地震作用下地形对桥梁和车辆的影响规律。

由于无砟轨道系统的存在,增大了相邻桥梁结构间的纵向刚度<sup>[15]</sup>,使得无砟轨道桥梁的抗震性能也与传统桥梁不相同<sup>[16-17]</sup>,在进行震时行车安全性研究时,以上学者对于研究高速铁路行车的安全性评价,大多未考虑无砟轨道系统的约束作用,而对于考虑轨道约束的研究,多以定性为主,缺少定量分析,地震下车-线-桥梁结构的动力响应规律及行车安全阈值有待深入研究。本文通过建立高速铁路多跨简支梁桥的车-线-桥一体化计算模型,得出有无无砟轨道系统约束下震时不同行车速度下列车脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力的变化规律,研究多遇地震下高速铁路无砟轨道桥梁桥上列车行驶的安全性,并提出行车安全阈值。

## 1 计算模型的建立

### 1.1 工程概况

本文以西部地区某一20×32 m高速铁路简支

梁桥为实际工程背景,桥梁采用等截面单箱单室梁,其中,箱梁顶板宽度为12 m,腹板厚度为0.45 m,底板宽度为5.5 m,梁高3.05 m,梁体采用C55混凝土;桥墩为不等高圆端型墩,采用C40混凝土,并按照10、20、30、20 m的高度依次循环布置。桥上采用CRTS II型板式无砟轨道,钢轨采用CHN60;轨道板截面尺寸为2.5 m×0.2 m,采用C55混凝土;底座板截面尺寸为2.95 m×0.3 m,采用C55混凝土。

### 1.2 车-线-桥数值模拟

本文采用SIMPACK与Workbench联合建立车-线-桥耦合振动模型,研究CRTS II型板式无砟轨道的纵向刚度对多遇地震作用下桥上行车安全性的影响,则分为考虑轨道约束的车-线-桥一体化模型和不考虑轨道约束的传统车-桥模型。

#### 1.2.1 CRTS II型板式无砟轨道系统的模拟

CRTS II型板式无砟轨道自上而下为钢轨、扣件、砂浆层、底座板、滑动层,其结构形式如图1所示。纵向多遇地震作用下假设构件间摩擦效应未充分发挥,忽略扣件的纵向阻力作用,在保证总质量和刚度不变的情况下,调整材料,将钢轨、轨道板及底座板集成为一个整体,从而简化计算模型。集成截面密度为 $2146\text{ kg/m}^3$ ,尺寸为 $2.5\text{ m}\times 0.53\text{ m}$ ,如图2所示,并采用Beam189单元模拟;仅考虑剪力齿槽的作用连接主梁及轨道板并采用Combin14弹簧单元模拟,刚度为 $1\times 10^7\text{ kN/m}^{[18]}$ ;为考虑后继路基结构影响,将轨道板两端与大地通过弹簧连接以模拟端刺作用,亦采用Combin14弹簧单元,其刚度

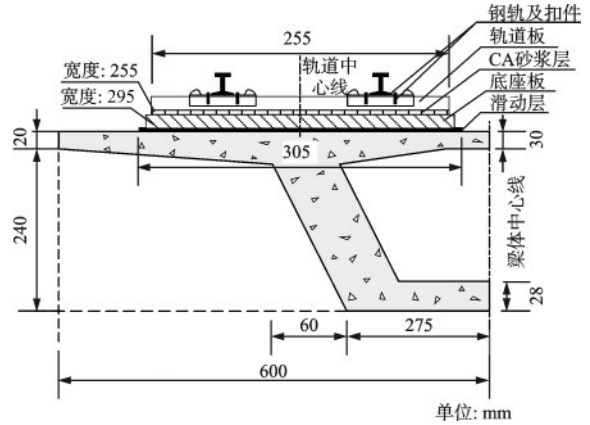


图1 CRTS II型板式无砟轨道结构图

Fig.1 Structure diagram of CRTS II slab ballastless track

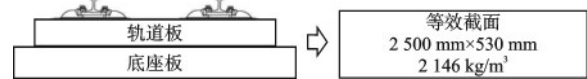


图2 轨道系统集成截面

Fig.2 Integrated cross-section of track system

为 $1\times 10^8\text{ kN/m}^{[18]}$ 。

#### 1.2.2 线-桥一体化模型的建立

通过有限元软件Workbench建立 $20\times 32\text{ m}$ 简支梁桥计算模型,分为不考虑轨道约束的桥梁计算模型和考虑轨道约束作用的线-桥一体化计算模型。主梁及桥墩均采用Beam189梁单元模拟,利用一般连接副连接支座和桥墩,以模拟支座,未考虑桩-土相互作用,线-桥一体化计算模型如图3所示,其中不考虑轨道约束的桥梁模型与之相一致,只是无上部轨道结构,故此不再给出,但是在传统计算模型中将轨道质量按照自重系数等效分配在梁体上。

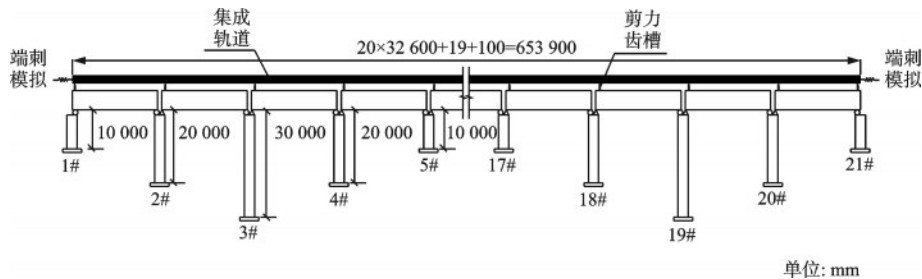


图3 线-桥一体化计算模型

Fig.3 Integrated track-bridge computing model

#### 1.2.3 车辆动力学模型的建立

利用有限元软件SIMPACK进行车辆模型的建立,列车本身是一个复杂的结构体系,由车体、转向架、轮对等结构组成,且其结构间是通过众多的弹簧及阻尼结构连接。由于车体、转向架及轮对的变形

可忽略不计,故将之视为刚体。在建模中,将列车简化为7个刚体,包括1个车体、2个转向架、4个轮对,共计31个自由度,如图4及表1所示。连接为力元模拟的一系及二系悬挂,不考虑阻尼及弹簧的非线性,将力元的刚度、阻尼定义为线性,故车辆模型为刚

体-弹簧-阻尼系统,其计算模型结构如图5所示。

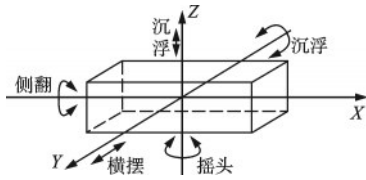


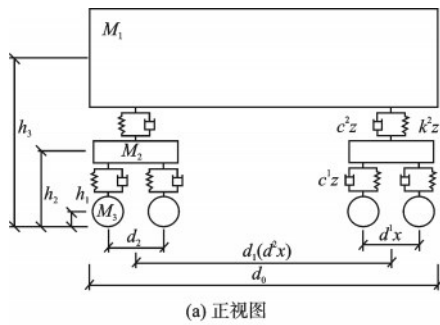
图4 自由度示意图

Fig.4 Schematic diagram of degrees of freedom

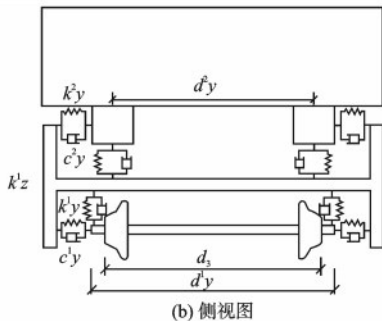
表1 车辆自由度分布

Table 1 Distribution of vehicle degrees of freedom

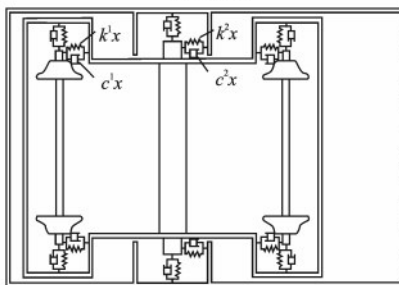
车辆构件	沉浮	点头	横摆	摇头	侧滚
车体	$Z_C$	$\varphi_C$	$Y_C$	$\psi_C$	$\theta_C$
前转向架	$Z_{t1}$	$\varphi_{t1}$	$Y_{t1}$	$\psi_{t1}$	$\theta_{t1}$
后转向架	$Z_{t2}$	$\varphi_{t2}$	$Y_{t2}$	$\psi_{t2}$	$\theta_{t2}$
前轮对1	$Z_{w1}$	/	$Y_{w1}$	$\psi_{w1}$	$\theta_{w1}$
前轮对2	$Z_{w2}$	/	$Y_{w2}$	$\psi_{w2}$	$\theta_{w2}$
后轮对1	$Z_{w3}$	/	$Y_{w3}$	$\psi_{w3}$	$\theta_{w3}$
后轮对2	$Z_{w4}$	/	$Y_{w4}$	$\psi_{w4}$	$\theta_{w4}$



(a) 正视图



(b) 侧视图



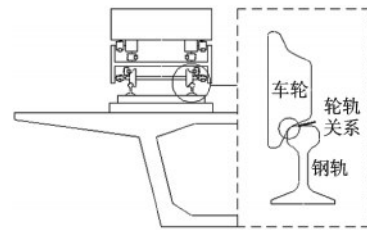
(c) 俯视图

图5 车辆动力学模型结构图

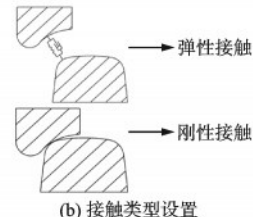
Fig.5 Structure diagrams of vehicle dynamics model

#### 1.2.4 车-线-桥一体化模型的建立

本文利用FEMBS接口程序将Workbench中建立的桥梁有限元模型导入SIMPACK中,与车辆模型进行耦合,联合建立出车-线-桥仿真计算模型。通过SIMPACK中的柔性轨道模块,定义轮轨间相互作用的离散点,以实现车-线-桥之间的相互作用力交换。其轮轨相互作用及接触类型如图6所示,且基于SIMPACK软件,利用其中的简化Kalker理论和FASTSIM数值计算方法计算轮轨接触的切向接触力,利用Hertz非线性弹性接触理论来计算法向接触力。



(a) 轮轨相互作用



(b) 接触类型设置

图6 车-线-桥模型相互作用

Fig.6 Interaction of vehicle-track-bridge model

#### 1.3 行车安全性评价指标限值定义

为了评估有无轨道约束下不同强度地震动作用时的行车安全性,本文通过《高速铁路设计规范》(TB10621—2014)<sup>[19]</sup>中规定的车辆运行中的脱轨系数、轮重减载率及横向水平力来判断并提出行车安全建议阈值。其安全性评价指标分别如式(1)~(3)所示。

$$\text{脱轨系数: } \frac{Q}{P} \leq 0.8 \quad (1)$$

式中, $P$ 为轮轨垂向力; $Q$ 为轮轨横向力。

$$\text{轮轨减载率: } \frac{\Delta P}{P} \leq 0.6 \quad (2)$$

式中, $\Delta P$ 为轮重减载量; $P$ 为轮重均值。

$$\text{横向水平力: } Q \leq 10 + \frac{P}{3} \quad (3)$$

式中, $P$ 为轮对静轴重。

## 1.4 地震波选取

桥梁所在场地类型为Ⅱ类场地,抗震设防烈度为8度,根据工程结构的场地特征及空间特征,按照《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)(2009版)<sup>[20]</sup>得到设计反应谱,并从地震波数据库中选取6条与之频谱特性接近的地震动激励,其地震波反应谱曲线如图7所示。为了减少计算时长,选用平均谱作为地震激励输入,得到其设计地震下地震波时程曲线如图8所示,为研究多遇地震作用下高速铁路桥上行车安全,将其峰值加速度分别调幅至0.05g、0.1g、0.2g和0.3g。本文未考虑行波效应,且由于SIMPACK系统中对地震激励输入方式有限制,需要将加速度时程转化为力的时程输入,故地震激励方式选为大质量法,沿桥梁纵向输入。

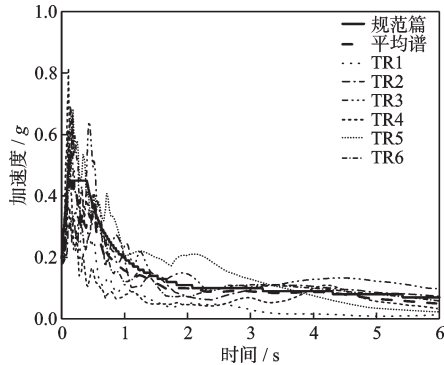


图7 地震波反应谱曲线

Fig.7 Seismic wave response spectrum curve

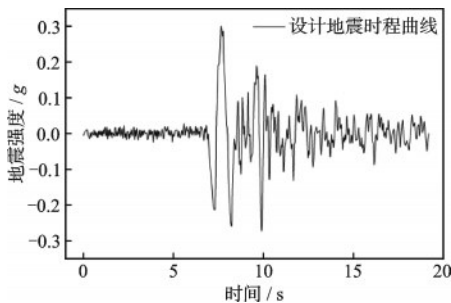


图8 地震波时程曲线

Fig.8 Seismic wave time history curve

## 2 计算结果分析

### 2.1 脱轨系数

将不同强度地震波与不同列车运行速度进行排列组合,得到各工况下有无轨道约束作用时的脱

轨系数如图9所示,可以得出,在未考虑轨道约束的车-桥系统中,当地震峰值加速度为0.3g,列车速度取300 km/h和350 km/h时,脱轨系数分别为0.81和1.19,均超过安全限值0.8,此时列车运行安全性受到威胁,则当地震峰值加速度为0.3g时,列车行驶速度不宜超过298 km/h。在考虑轨道约束的车-线-桥系统中,当地震峰值加速度为0.3g,列车速度为350 km/h时,列车脱轨系数为1.01超过限值,此时容易出现脱轨现象,应降低车速至316 km/h以下。其他工况下脱轨系数均小于0.8,此时行车运行安全。

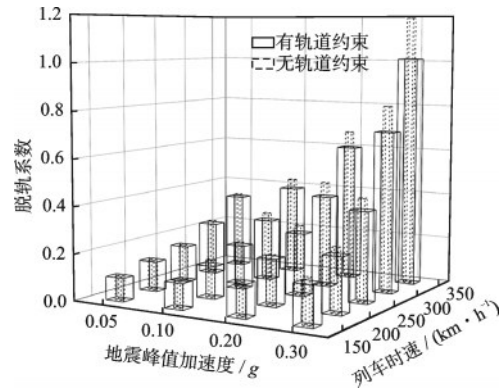


图9 脱轨系数

Fig.9 Derailed coefficient

无论是否考虑轨道约束作用,其脱轨系数均随着地震强度和列车速度的增大而增大。在同一地震强度下,脱轨系数与列车速度的变化呈正相关,但增加的幅值有所差异,当列车速度位于250 km/h以下,地震强度小于0.2g时,其脱轨系数增加的幅值要明显小于其他工况的幅值;在同一行驶速度下,其脱轨系数亦与地震强度的变化呈正相关,且地震强度愈大,其变化的幅度也愈大。当列车以低速行驶或者地震峰值加速度较小时,两种系统的脱轨系数基本一致,但从整体来看,未考虑轨道约束的车-桥系统脱轨系数要大于车-线-桥系统,相比平均增大7.19%,其中最大相差了15.1%,其行车安全性相比较差。

### 2.2 轮重减载率

将不同强度地震波与不同列车运行速度进行排列组合,得到各工况下有无轨道约束作用时的轮重减载率如图10所示,从图中可以得到,在未考虑轨道系统作用的车-桥结构系统中,列车运行速度为300 km/h,地震峰值为0.3g时,列车的轮重减载率

为0.7,列车运行速度为350 km/h,地震峰值为0.2g与0.3g时,其轮重减载率分别为0.72、0.93,三种工况均超过安全限值0.6,此时列车行车安全性受到极大威胁。当地震峰值为0.2g时,车速不应大于307 km/h;当地震峰值为0.3g时,车速不应大于276 km/h。在考虑轨道系统的车-线-桥系统中,当地震峰值为0.2g,列车运行速度为350 km/h,此时列车轮重减载率为0.72,超过安全限值,建议降速至307 km/h行驶;当地震峰值为0.3g,列车运行速度为300 km/h时,轮重减载率已达到0.61,具有脱轨风险,为保证行车安全,列车应降速至297 km/h。其他工况均未超过安全限值,此时列车运行安全。

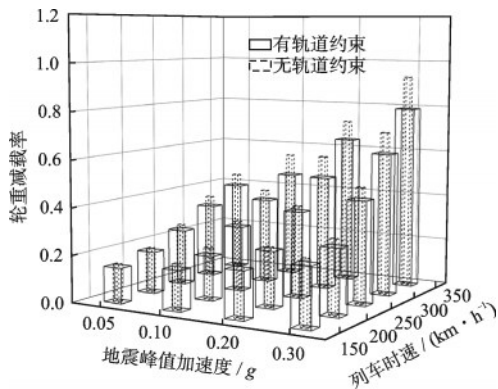


图10 轮重减载率

Fig.10 Wheel load reduction rate

两种系统下列车的轮重减载率均随着地震强度和列车行驶速度的增大而增大。在同一地震动作用下,列车的轮重减载率随着列车速度的增大而递增,且高速状态下增加的幅度要大于低速增加的幅度;在同一列车速度下,其轮重减载率随着地震强度的增大而增大,且随着列车速度的不断提升,其轮重减载率随地震强度的变化愈明显。总体来说,考虑轨道系统情况下的轮重减载率均要小于未考虑的情况,与之相比其轮重减载率平均降低了9.96%,其中最大降低了15.1%,列车发生脱轨的可能性更小。

### 2.3 轮轨横向力

将不同强度地震波与不同列车运行速度进行排列组合,得到各工况下有无轨道约束作用时的轮对横向力如图11所示,进而可以得出,在未考虑轨道系统的车-桥结构体系中,当地震峰值为0.2g,行驶速度为350 km/h时,列车的轮对横向力为56.86 kN,超过限值45 kN,此时桥上行车安全性受

到威胁,建议降速至314 km/h;当地震峰值为0.3g,行驶速度为300 km/h,此时轮对横向力为52.91 kN,已超过限值,建议降速至278 km/h。在考虑轨道系统的车-线-桥体系中,当地震峰值为0.2g,行驶速度为350 km/h时,轮对横向力为50.03 kN,超过安全限值,列车行车安全性降低,建议降速至332 km/h;当地震峰值为0.3g,行驶速度为300 km/h时,其值为45.03 kN,已不能保证列车行驶安全,此时建议降速至299 km/h。其他工况下列车运行相对安全。

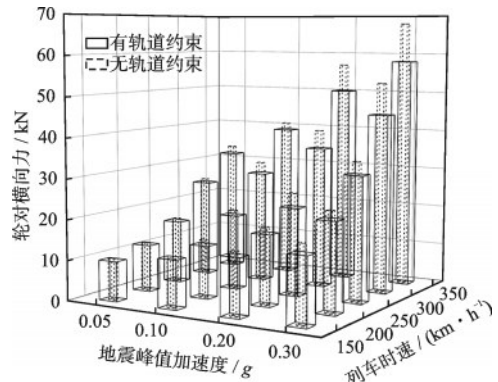


图11 轮对横向力

Fig.11 Wheelset lateral force

两种系统下的轮对横向力均随着地震强度和列车运行速度的增大而递增。在同一地震强度下,列车的轮轨横向力与列车速度呈正相关,但高速下其变化的幅度要大于低速时变化的幅度。在同一列车行驶速度下,列车的轮轨横向力亦与地震强度正相关。列车在低速行驶时或者当地震强度较低时,两种系统下的轮对横向力数值相近,轨道系统的约束作用并不明显,但整体来看,考虑轨道系统的车-线-桥系统其轮对横向力要明显小于车-桥系统,平均相比减少了7.97%,其中最大减少了14.9%,其桥上行车安全性更高。

### 2.4 行车安全阈值

通过分别研究有无轨道约束时,不同强度地震下、列车行驶速度运营下,列车的脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力的变化规律,得出行车安全运行的阈值,如图12所示。

从图中可以得出,为确保列车安全行驶,在考虑轨道约束的车-线-桥系统中,若列车行驶速度为350 km/h,此时可承受的地震峰值加速度最高为0.155g;若列车行驶速度为300 km/h,此时可承受的地震峰值加速度最高为0.291g;若地震峰值加速

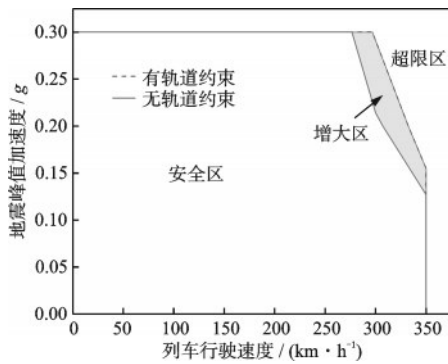


图12 行车安全阈值

Fig.12 Safety threshold diagram for train operation

度为 $0.2g$ ,此时列车行驶速度不宜超过 $332.4\text{ km/h}$ ;若地震峰值加速度为 $0.3g$ ,此时列车行驶速度不宜超过 $296.87\text{ km/h}$ 。

在未考虑轨道约束的车-桥系统中,若列车行驶速度为 $350\text{ km/h}$ ,此时可承受的地震峰值加速度最高为 $0.127g$ ;若列车行驶速度为 $300\text{ km/h}$ ,此时可承受的地震峰值加速度最高为 $0.214g$ ;若地震峰值加速度为 $0.2g$ ,此时列车行驶速度不宜超过 $307.14\text{ km/h}$ ;若地震峰值加速度为 $0.3g$ ,此时列车行驶速度不宜超过 $276.52\text{ km/h}$ 。

通过对比行车安全阈值图,可以得出CRTS II型板式无砟轨道系统的纵向刚度提高了列车运行的安全阈值。当列车运行速度为 $350\text{ km/h}$ 时,其可承受的地震峰值加速度增加了 $22.04\%$ ;当列车运行速度为 $300\text{ km/h}$ 时,其可承受的地震峰值加速度增加了 $36\%$ ;当地震峰值加速度为 $0.2g$ 时,列车可安全行驶的速度增大了 $7.24\%$ ;当地震峰值加速度为 $0.2g$ 时,列车可安全行驶的速度增大了 $8.14\%$ 。相比之下,列车运行速度的影响更大,当地震来临时,应该适当减速慢行。

### 3 结论

本文通过分别建立车-线-桥耦合计算模型和车-桥模型,研究有无轨道约束下多遇地震对于桥上行车安全性的影响,并提出行车安全阈值,主要得到以下结论:

(1) 无论是否考虑无砟轨道系统,列车的脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力均随着地震强度和列车行驶速度的增大而增大。

(2) 与不考虑无砟轨道约束作用的车-桥系统相比,车-线-桥系统的脱轨系数、轮重减载率、轮对横

向力平均分别降低了 $7.19\%$ 、 $9.96\%$ 、 $7.97\%$ ,其中相差最大值约降低了 $15\%$ 。

(3) 考虑轨道系统的约束作用可有效提高行车安全阈值,列车运行速度为 $350\text{ km/h}$ 时,其可承受的地震峰值加速度增加 $22.04\%$ ;当列车运行速度为 $300\text{ km/h}$ 时,其可承受的地震峰值加速度增加 $36\%$ ;当地震峰值加速度为 $0.2g$ 时,列车可安全行驶的速度增大 $7.24\%$ ;当地震峰值加速度为 $0.2g$ 时,列车可安全行驶的速度增大了 $8.14\%$ 。列车的行驶速度相对而言影响更大,当地震来临时,应减速慢行。

(4) 无砟轨道系统增大了多跨简支梁桥的整体刚度,提高了震时高速铁路桥上列车运行的安全性,在该类桥梁设计与计算时应该考虑无砟轨道系统的约束效应。

### 参考文献:

- [1] 蒋丽忠,周旺保,魏标,等.地震作用下高速铁路车-轨-桥系统安全研究进展[J].土木工程学报,2020,53(9):1-13.  
Jiang L Z, Zhou W B, Wei B, et al. Research progress of vehicle-rail-bridge system safety in high-speed railway under earthquake action [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9):1-13. (in Chinese)
- [2] Yu L F, Hong Y L, Jian Y, et al. Applicability of existing CRTS II ballastless track-Continuous girder bridge system under near-field transverse rare earthquake [J]. Engineering Structures, 2022, 273(115076):1-13.
- [3] 宁迎智,吴伟,杨全亮.横向地震作用下车辆-板式无砟轨道系统随机振动分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(3):630-637.  
Ning Y Z, Wu W, Yang Q L. Horizontal earthquake under the action of vehicle and random vibration analysis of slab without a frantic jumble track system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3):630-637. (in Chinese)
- [4] 国巍,李君龙,刘汉云.强地震下高速铁路桥上行车精细化模拟及行车安全性分析[J].工程力学,2018,35(增1):259-264,277.  
Guo W, Li J L, Liu H Y. Fine simulation and safety analysis of running on high-speed railway bridge under strong earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35 (Sup1):259-264,277. (in Chinese)
- [5] 梁岩,闫士昌,陆尧,等.近海高速铁路桥梁时变地震易损性分析[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):

- 1248-1256.
- Liang Y, Yan S C, Lu Y, et al. Time-varying seismic fragility analysis of offshore high-speed railway bridges [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6):1248-1256.(in Chinese)
- [6] 贾毅, 赵人达, 廖平, 等. 高烈度地震区大跨长联连续梁桥抗震分析及性能评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4):681-688.
- Jia Y, Zhao R D, Liao P, et al. Seismic resistance analysis and performance evaluation of large span continuous beam bridge un high intensity seismic region [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4):681-688.(in Chinese)
- [7] Gong W, Zhu Z, Wang K, et al. A real-time cosimulation solution for train-track-bridge interaction [J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(13/14):1606-1616.
- [8] Jiang H, Zeng C, Peng Q, et al. Running safety and seismic optimization of a fault-crossing simply-supported girder bridge for high-speed railways based on a train-track-bridge coupling system [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(8):2449-2466.
- [9] Mohammad S, Mohammad Z, Hossein A V. Seismic analysis of soil-pile-bridge-train interaction for isolated monorail and railway bridges under coupled lateral-vertical ground motions [J]. Engineering Structures, 2021, 248:113258.
- [10] 韩艳, 夏禾. 地震作用下高速铁路桥梁的动力响应及行车安全性研究 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3):136-138.
- Han Y, Xia H. Research on dynamic response and traffic safety of high-speed railway bridge under earthquake action [J]. China Railway Science, 2006, 27(3):136-138.(in Chinese)
- [11] 杨勋, 王欢欢, 金先龙. 地震作用下隧道-列车系统动力响应及安全性分析 [J]. 工程力学, 2016, 33(12):176-185.
- Yang X, Wang H H, Jin X L. Dynamic response and safety analysis of tunnel-train system under earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(12):176-185.(in Chinese)
- [12] 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):148-155.
- Lou Y F, Shi Y Z, Chen R, et al. Seismic response and safety analysis of reinforced subgrade-train coupling system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(14):148-155.(in Chinese)
- [13] 雷虎军, 孙昱坤. 地震动分量对车-轨-桥系统动力响应影响研究 [J]. 桥梁建设, 2020, 50(5):73-77.
- Lei H J, Sun Y K. Study on the effect of ground motion components on the dynamic response of vehicle-rail-bridge system [J]. Bridge Construction, 2020, 50(5):73-77.(in Chinese)
- [14] 乔宏, 夏禾, 杜宪亭, 等. 考虑地形条件影响的车桥耦合系统地震响应分析 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(17):69-76.
- Qiao H, Xia H, Du X T, et al. Seismic response analysis of vehicle-bridge coupling system considering the influence of terrain conditions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(17):69-76.(in Chinese)
- [15] 刘尊稳. 基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁抗震性能及设计方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5):1080.
- Liu Z W. Research on seismic performance and design method for high-speed railway bridges based on track-bridg integrated model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5):1080.(in Chinese)
- [16] 李军歌, 周超. 脉冲地震下高速铁路梁-轨系统响应分析 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9):116-120, 126.
- Li J G, Zhou C. Response analysis of high-speed railway beam-rail system under pulse earthquake [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9):116-120, 126.(in Chinese)
- [17] 高建强, 张永亮, 陈兴冲, 等. 无砟轨道系统对铁路减隔震桥梁地震响应的影响 [J]. 世界地震工程, 2017, 33(1):202-208.
- Gao J Q, Zhang Y L, Chen X C, et al. Influence of ballastless track system on seismic response of railway isolation bridges [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1):202-208.(in Chinese)
- [18] 刘尊稳, 张英剑, 陈兴冲, 等. 纵连板式无砟轨道对桥梁地震响应的的影响参数分析 [J]. 兰州交通大学学报, 2016, 35(6):14-18.
- Liu Z W, Zhang Y J, Chen X C, et al. Parameter analysis of influence of CRTS II slab ballastless track on seismic response of bridges [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2016, 35(6):14-18.(in Chinese)
- [19] 高速铁路设计规范: TB 10621—2014 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [20] 铁路工程抗震设计规范(2009年版): GB 50111—2006(2009年版) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

(本文编辑: 池营营)