文章编号:1005-0523(2023)05-0083-06

基于结构动力学的无砟轨道抗震设计参数研究

夏景辉[1],臧传臻[2]

(1. 中国中铁电气化局集团有限公司,北京 100036; 2. 中国铁路设计集团有限公司,天津 300308)

摘要:为了研究合理的轨道结构抗震设计参数,基于轨道结构动力学理论,建立考虑地震激励源的轨道动力学分析模型,计算地震激励引起的CRTSⅢ型板式无砟轨道结构动力响应,进而研究轨道结构参数变化对各动力响应变量的影响规律,得出以下结论:典型地震波的频率基本处在0~10 Hz范围内,轨道结构的三向自振频率均大于10 Hz;地震作用下的轨道位移可能会超过规范限值要求,可通过将复合轨道板和底座相连接的方式加强轨道结构抗震;当扣件刚度或底座板弹性模量递增时,轨道结构动力响应指标均随之递增,因此在确保轨道参数合理匹配的前提下,适当降低扣件刚度、底座弹性模量有利于结构抗震设计;当扣件刚度或底座板弹性模量改变时,轨道板横向位移、底座板纵向应力、钢轨横向加速度显著变化,检算时需重点关注。研究成果可为轨道结构抗震设计、抗震评估、抗震加固措施提供借鉴。

关键词:无砟轨道;地震荷载;动力响应;结构抗震设计

中图分类号:U213.2+2 **文献标志码**:A

本文引用格式:夏景辉,臧传臻. 基于结构动力学的无砟轨道抗震设计参数研究[J]. 华东交通大学学报,2023,40(5):83-88.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.05.002

Study on Seismic Design Parameters of Ballastless Track Based on Structural Dynamics

Xia Jinghui[1], Zang Chuanzhen[2]

(1. China Railway Electrification Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100036, China;
2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: To study reasonable seismic design parameters of track structures, based on the theory of structural dynamics, a track dynamics analysis model considering seismic excitation sources was established. The dynamic response of CRTS Ⅲ slab ballastless track caused by seismic excitation was calculated. The influence of track structure parameters on dynamic response variables were studied. The findings show that the frequency of the typical earthquake waves is mainly in the range of 0~10 Hz. The three-dimensional natural frequencies of the track structure are greater than 10 Hz. The track displacement under earthquake may exceed the standard limit requirements, and the composite track slab can be connected to the base to strengthen the seismic resistance of the track structure. When the stiffness of the fasteners or the elastic modulus of the base increases, the dynamic response indicators basically increase accordingly. When reasonable matching of track parameters is ensured, appropriately reducing the stiffness of the fasteners and the elastic modulus of the base is beneficial for structural seismic design. When the stiffness of the fastener or the elastic modulus of the base changes, the lateral displacement of the track slab, the longitudinal stress of the base, and the lateral acceleration of the rail are signifi-

收稿日期:2023-08-16

基金项目:中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2021A240106,2022BXZ005)

cantly changed, which should be paid attention to during the calculation. The results can provide reference for seismic design, evaluation, and reinforcement measures of track structures.

Key words: ballastless track; earthquake load; dynamic response; structural seismic design

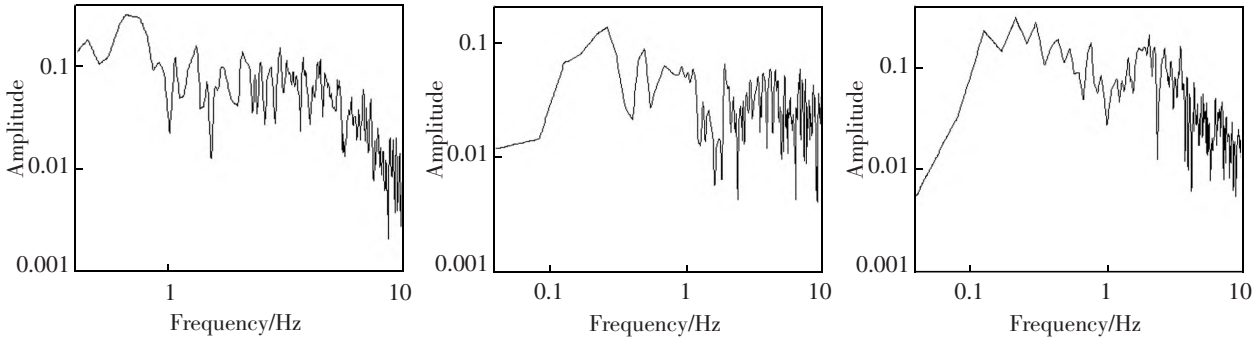
Citation format: XIA J H, ZANG C Z. Study on seismic design parameters of ballastless track based on structural dynamics[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(5): 83–88.

地震荷载对铁路安全运营的威胁很大,它一方面可引起轨道下部基础结构(桥梁、路基、隧道等)严重破坏;另一方面在轨道下部基础结构未破坏的情况下,亦可造成轨道结构变形。目前国内外相关研究成果主要针对下部基础工程抗震,在抗震设计与验算、抗震评估方面均形成了系统性的规范与标准。贾红梅[1]针对高铁桥梁抗震设计构建了设计框架和分析方法;王炎[2]以考虑减隔震支座的铁路减隔震桥梁为研究对象,研究了其抗震设计、抗震性能和地震易损性;江辉[3]建立了同时考虑累积耗能和最大变形需求的基于预期性能目标的桥梁结构抗震设计方法;欧进萍等[4-5]基于 Park-Ang 双参数损伤模型,提出了基于地震损伤性能的钢筋混凝土结构设计方法;朱晞等[6]完善了以损伤性能为控制指标的强度折减因子和等效位移延性系数,并考虑近断层地震下的能量和变形需求,提出了考虑损伤性能的 RC 桥墩抗震设计方法;黄尚[7]提出了高铁桥梁基于位移和损伤的抗震设计方法,并进行了抗震性能评估;Shao 等[8],蒋丽忠等[9]通过将试验、理论分析、数值模拟相结合,分析了纵筋率、配箍率、剪跨比、轴压比对圆端形空心墩抗震性能的影响;沙峰等[10]进行了地震作用下列车,桥梁空间耦合系统动力学特性研究;闫斌等[11]研究了地震作用下门式墩结构对梁轨系统受力特性的影响;张鹏飞等[12]基于有限元法和梁-轨-板相互作用原理,分析了地震作用下桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道系统的动力响应;蒋丽忠等[13-15]研究了地震作用下的桥上轨道不平顺变化规律,进而分析了不平顺对行车动力响应的影响。以上研究主要针对下部基础工程抗震设计与验算、抗震评估,关于轨道结构主要为地震作用对轨道不平顺的影响,以及不平顺对行车动力响应的影响。

目前极少有轨道抗震设计方面的研究,在《高速铁路线路维修规则》(TG/GW115—2023)中,也缺乏地震后的轨道维修规定。因此本文基于轨道结构动力学仿真,计算地震激励引起的 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构动力响应,进而研究轨道结构参数变化对各动力响应变量的影响规律,从而为轨道结构抗震设计、抗震评估、抗震加固措施提供借鉴。

1 典型地震波频域分析

令地震传播方向与铁路线路方向垂直,将某典型地震时域波进行傅里叶变换,得到地震加速度频谱,从而确定地震的主频段,图 1 为该地震波的三向加速度频谱。可知横、竖、纵向的峰值频率分别为 0.65, 0.3, 0.25 Hz,且频率基本处在 0~10 Hz 的范围内。



(a) Acceleration spectrum of lateral (b) Acceleration spectrum of vertical (c) Acceleration spectrum of longitudinal

图 1 典型地震波三向加速度频谱

Fig.1 Three directional acceleration spectrum of the typical earthquake wave

2　仿真模型建立

针对 CRTSⅢ型板式无砟轨道，建立结构动力学计算模型，如图 2 所示，该模型主要分为 3 层：第 1 层是通过欧拉梁模拟的钢轨结构，第 2 层是通过实体单元模拟的复合板结构（轨道板和自密实混凝土层叠合为一体），第 3 层是通过实体单元模拟的底座板。钢轨和轨道板之间的扣件通过三向弹簧元件模拟，自密实混凝土层上的凸台与底座板上的凹槽相咬合，底座板与大地间通过弹簧元件相连，通过弹簧元件来模拟下部隧道基础的支承刚度。

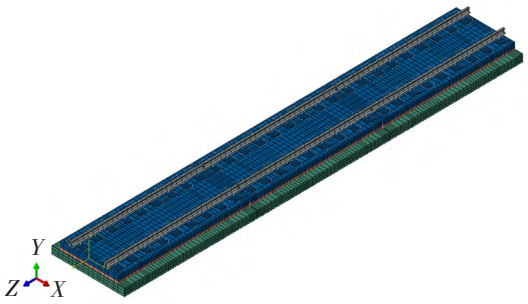


图 2　板式无砟轨道模型

Fig.2　Slab ballastless track model

扣件间距为 630 mm，每组扣件垂向、横向刚度分别为 40，50 kN/mm。轨道板的长、宽、厚分别为 5.6，2.5，0.2 m，材料为 C60 混凝土，弹性模量为 3.65×10^{10} Pa，密度为 2.5×10^{3} kg/m^3。自密实混凝土层的长、宽、厚分别为 5.6，2.5，0.1 m，材料为 C40 混凝土，弹性模量为 3.4×10^{10} Pa，密度为 2.5×10^{3} kg/m^3。底座板的长、宽、厚分别为 17.0，3.1，0.3 m，材料为 C40 混凝土，弹性模量为 3.4×10^{10} Pa，密度为 2.5×10^{3} kg/m^3，底座板凹槽的长、宽、厚分别为 0.7，1.0，0.1 m。支承面刚度为 1 200 MPa/m，支承面阻尼为 1×10^{5} N·s/m。轨道板与自密实混凝土层相连构成复合板，自密实混凝土层底面与底座顶面、凸台与凹槽之间均设置接触关系，沿法向为硬接触，沿切向的摩擦系数取 0.7。

通过模态分析计算得到该模型的前 6 阶振型的自振频率分别为 72.319，72.574，82.612，82.953，104.76，105.52 Hz，均超过本文地震波主频段范围，因此该轨道结构在受地震作用时不会产生共振。在轨道结构底部施加非对称的三向随机地震时域荷载，通过瞬态分析研究地震作用下轨道动力响应特性。

3　地震作用下轨道动力响应分析

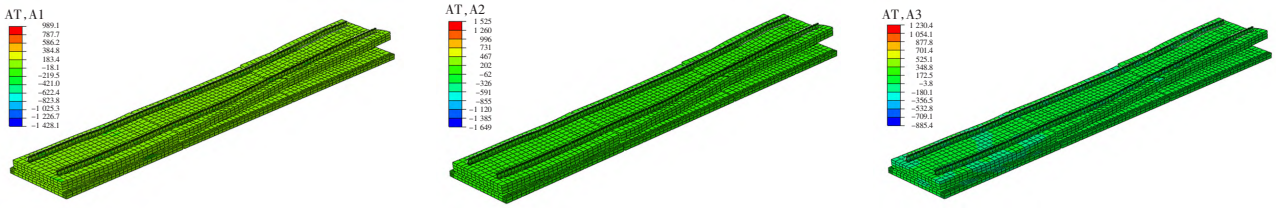
3.1　轨道结构动力响应分布特性

1）振动加速度。轨道结构的三向峰值振动加速度云图如图 3 所示。据《高速铁路设计规范》(TB10621—2014)，对于无砟轨道，钢轨加速度限值为 5 000 m/s^2，轨道板加速度限值为 300 m/s^2，由图3可知，钢轨和轨道板的加速度均未超限值。

2）应力。图 4 为轨道结构受地震作用过程中的峰值应力云图。由图可知，钢轨应力小于《高速铁路设计规范》(TB10621—2014) 规定的 351.5 MPa；轨道板应力均小于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010(2015 年版))规定的 C60 混凝土抗拉强度设计值 2.04 MPa 和抗压强度设计值 27.5 MPa；自密实混凝土和底座板应力均小于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010(2015 年版))规定的 C40 混凝土抗拉强度设计值 1.71 MPa 和抗压强度设计值 19.1 MPa，符合设计要求。由图 4 可见钢轨和混凝土结构所受的应力均小于规范中的限值要求。

3）位移。图 5 为轨道结构受地震作用过程中的峰值位移云图。由图可见地震作用下的轨道结构竖向位移太大，致使自密实混凝土层与底座之间发生明显分离，远超安全限值，故对于已产生过大变形或变形可能会超限的线路区段，均应采取结构补强措施，以确保下次地震作用下结构的位移不会超限。

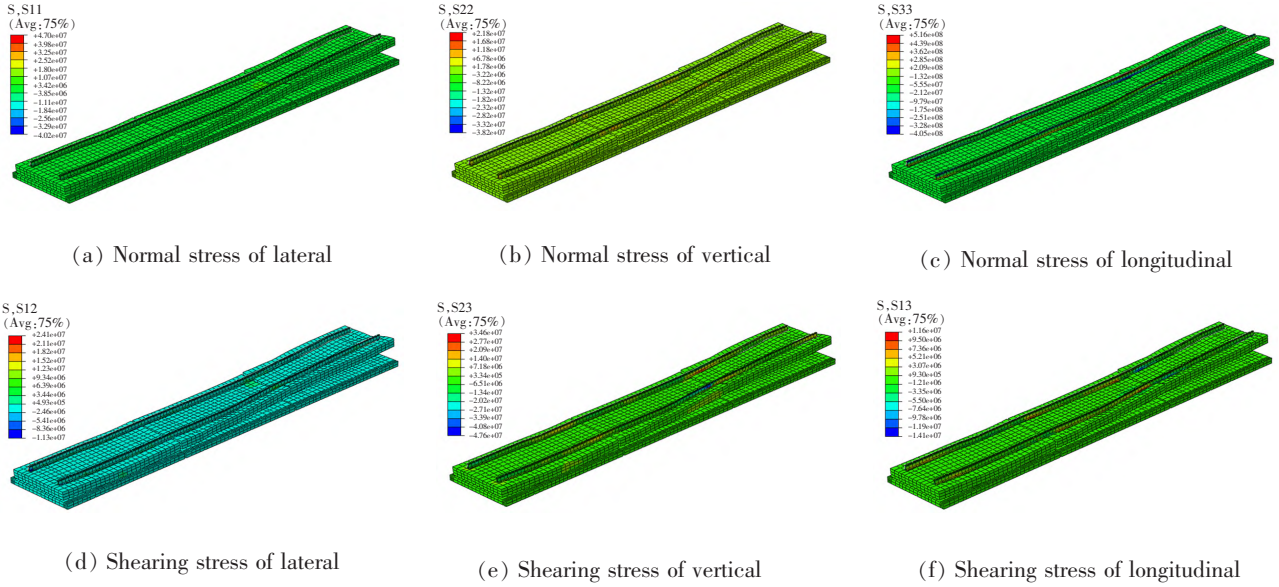
由图 5 可知，有必要加强自密实层和底座之间的



(a) Acceleration of lateral　　(b) Acceleration of vertical　　(c) Acceleration of longitudinal

图 3　轨道结构峰值振动加速度云图(单位：m/s^2)

Fig.3　Peak vibration acceleration of track (unit: m/s^2)

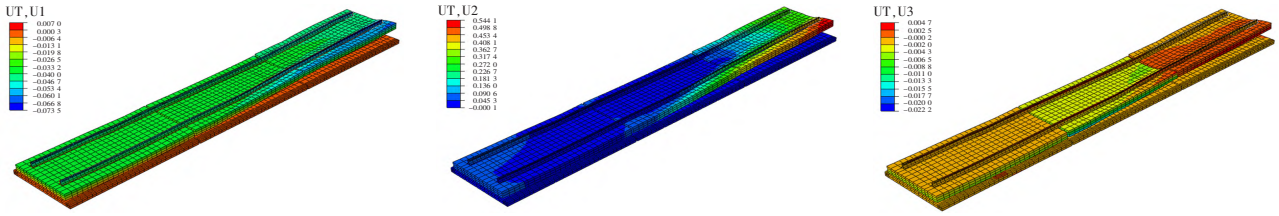


(a) Normal stress of lateral (b) Normal stress of vertical (c) Normal stress of longitudinal

(d) Shearing stress of lateral (e) Shearing stress of vertical (f) Shearing stress of longitudinal

图 4 轨道结构峰值应力云图(单位:Pa)

Fig.4 Peak stress of track structure(unit:Pa)



(a) Displacement of lateral (b) Displacement of vertical (c) Displacement of longitudinal

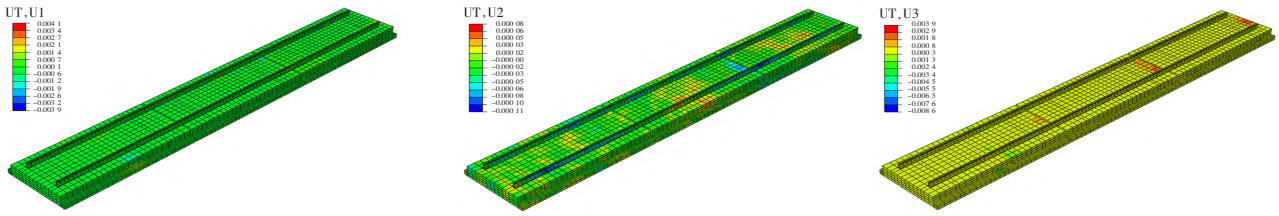
图 5 轨道结构峰值位移云图(单位:m)

Fig.5 Peak displacement of track structure(unit:m)

连接,因此本文对于已运营线路采用的轨道结构补强措施是通过植筋(将自密实层和底座连接)的方式,对于新建线路采用的轨道结构抗震对策是取消自密实层和底座之间的隔离层,即均是将复合轨道板与底座连接成整体,以减小复合轨道板的三向位移。图 6 为植筋后轨道结构受地震作用时的峰值位移云图。由图可知轨道结构在受到地震作用后,位移峰值仅为毫米级,可通过调节扣件来确保震后轨道不平顺从而满足行车安全性要求。此种方式可用于轨道结构抗震设计、抗震加固。

3.2 扣件刚度对动力响应的影响

设置植筋且不改其他参数,取 20~60 kN/mm 的扣件刚度,得到各部件中点处动力响应峰值如图 7 所示。



(a) Displacement of lateral (b) Displacement of vertical (c) Displacement of longitudinal

图 6 植筋后轨道结构峰值位移云图(单位:m)

Fig.6 Peak displacement cloud map of track structure after reinforcement planting(unit:m)

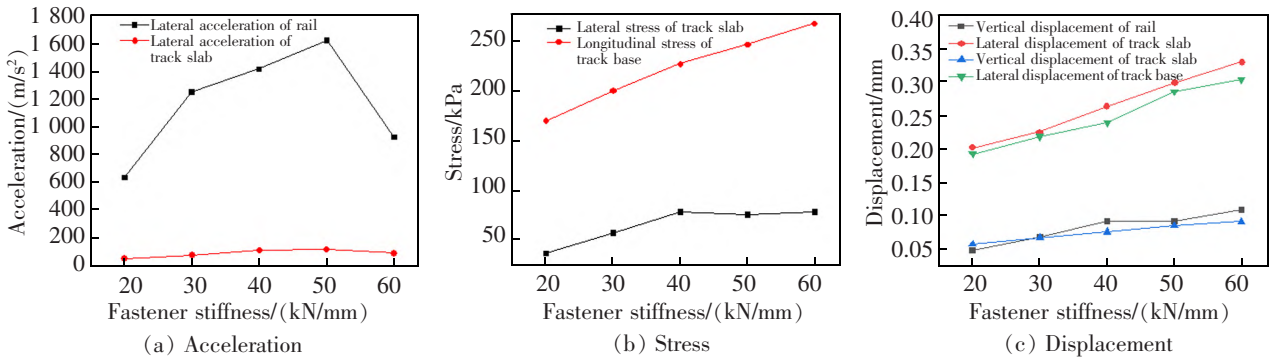


图 7　轨道动力响应和扣件刚度的关系

Fig.7　Relationship between track dynamic response and fastener stiffness

由图 7 可知:

1) 当扣件刚度递增时,轨道板横向应力、底座板纵向应力、钢轨垂向位移、轨道板横垂向位移、底座板横向位移均随之递增,增幅分别可达 200%,59%,100%,80%,67%,34%,且底座板纵向应力、轨道板横向位移的增量尤为显著,检算时需重点关注。

2) 当扣件刚度递增时,钢轨横向加速度、轨道板横向加速度均随之先递增后递减,变化幅度分别可达 146%,130%,且钢轨横向加速度的变化显著,检算时需重点关注。

3) 地震所引起的轨道结构的横向位移大于垂向位移。

综上所述,在确保轨道参数合理匹配的前提下,适当降低扣件刚度有利于结构抗震设计。

3.3　底座板弹性模量对动力响应的影响

由于地震荷载的传递路径是自下而上,底座最先受到动荷载影响,因此底座板弹性模量对动力传递的影响显著。设置植筋且不改其他参数,底座弹性模量依次设为 3×10^4,5×10^4,7×10^4,9×10^4 MPa,得到各部件中点处动力响应峰值如图 8 所示。

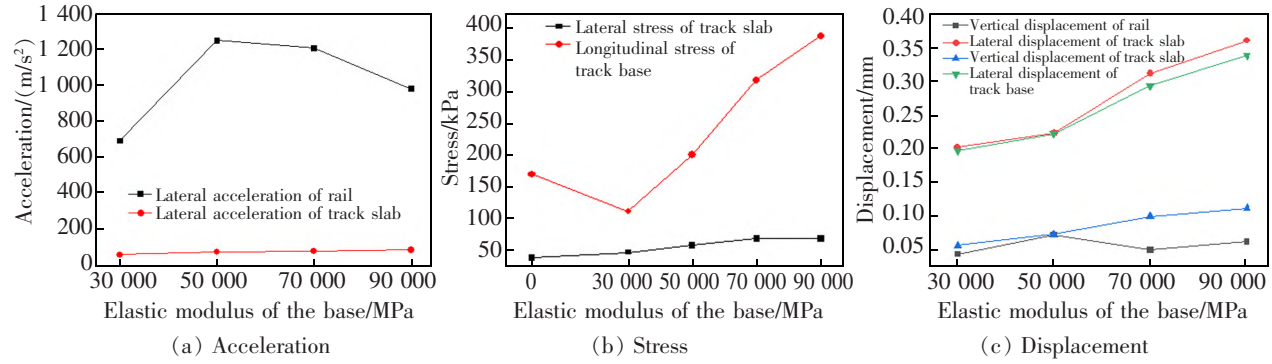


图 8　轨道动力响应和底座弹性模量的关系

Fig.8　Relationship between track dynamic response and base elastic modulus

由图 8 可知:

1) 当底座弹性模量递增时,轨道板横向加速度、轨道板横向应力、底座板纵向应力、轨道板横垂向位移、底座板横向位移均随之递增,增幅分别可达 43%,50%,245%,80%,83%,73%,且底座板纵向应力、轨道板横向位移的增量尤为显著,检算时需重点关注。

2) 当底座弹性模量递增时,钢轨横向加速度随之先递增后递减,钢轨垂向位移随之先递增后递减再递增,变化幅度分别可达 78%,75%,且钢轨横向加速度的变化显著,检算时需重点关注。

综上所述,在确保轨道参数合理匹配的前提下,适当降低底座弹模有利于结构抗震设计。

4　结论

1) 典型地震波的频率基本处在 0~10 Hz 的范围内,且轨道结构的三向自振频率均大于 10 Hz。

2) 地震作用下的轨道位移可能会超过规范限值要求,对于无砟轨道结构形式,可通过采用植筋的方式来加强轨道结构抗震,以减小复合轨道板的

三向位移,有利于确保震后轨道不平顺满足行车安全性的要求。

3)当扣件刚度或底座板弹性模量递增时,轨道结构动力响应指标均随之递增,因此在确保轨道参数合理匹配的前提下,适当降低扣件刚度、底座弹性模量有利于结构抗震设计。

4)当扣件刚度或底座板弹性模量改变时,轨道板横向位移、底座板纵向应力、钢轨横向加速度变化显著,抗震检算时需重点关注。

参考文献:

[1] 贾红梅. 客运专线圆端形桥墩的抗震性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
JIA H M. Seismic performance of round end pier in passenger railway[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2008.

[2] 王炎. 铁路减隔震桥梁地震反应分析及易损性研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
WANG Y. Research on seismic performance and fragility of isolated railway bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[3] 江辉. 近场地震下桥梁结构基于性能抗震设计的能量方法[D]. 北京:北京交通大学,2007.
JIANG H. Performance-based seismic design of bridges structure excited by near-fault earthquake using energy concept[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2007.

[4] 欧进萍,何政,吴斌,等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(1):21-30.
OU J P,HE Z,WU B,et al. Seismic damaged performance-based design of reinforced concrete structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1999,19(1):21-30.

[5] 何政,欧进萍. 钢筋混凝土结构基于改进能力谱法的地震损伤性能设计[J]. 地震工程与工程振动,2000,20(2):31-38.
HE Z,OU J P. Seismic damage performance design of reinforced concrete structures based on improved capacity spectrum method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2000,20(2):31-38.

[6] 朱晞,江辉. 桥梁墩柱基于性能的抗震设计方法[J]. 土木工程学报,2009,42(4):85-92.
ZHU X,JIANG H. Performance-based seismic design method for RC bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(4):85-92.

[7] 黄尚. 高速铁路桥梁基于性能的抗震设计方法研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
HUANG S. Research on performance-based seismic design methods for high-speed railway bridges[D]. Changsha:Central South University,2011.

[8] SHAO G,JIANG L,CHOU W N. Experimental investigations of the seismic performance of bridge piers with rounded rectangular cross-sections[J]. Earthquakes and Structures, 2014,7(4):463-484.

[9] 蒋丽忠,邵光强,王辉,等. 高速铁路圆端形空心桥墩抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2014,31(3):72-82.
JIANG L Z,SHAO G Q,WANG H,et al. Experimental study on seismic performance of hollow piers with rounded rectangular cross section in high-speed railways[J]. Engineering Mechanics,2014,31(3):72-82.

[10] 沙峰,姚林泉,程曦. 地震作用下列车-桥梁空间耦合系统动力响应分析[J]. 华东交通大学学报,2015,32(4):11-17.
SHA F,YAO L Q,CHENG X. Dynamic analysis on spatial coupled system of train and bridge under the influence of earthquake[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015,32(4):11-17.

[11] 闫斌,匡文飞,余丽梅,等. 高速铁路门式墩-桥梁-轨道系统地震响应特征[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3544-3550.
YAN B,KUANG W F,YU L M,et al. Characteristics of seismic response of high-speed railway frame pier-bridge-track system[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2023,54(9):3544-3550.

[12] 张鹏飞,蔡科,雷晓燕,等. 地震作用下桥上CRTSⅢ型板式无砟轨道纵向动力响应分析[J]. 北京交通大学学报,2023,47(1):45-53.
ZHANG P F,CAI K,LEI X Y,et al. Longitudinal dynamic response analysis of CRTS Ⅲ slab track on bridge under seismic action[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023,47(1):45-53.

[13] 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 train-track-bridge system safety of high-speed railway under earthquake action[J]. China Civil Engineering Journal, 2020,53(9):1-13.

[14] 周旺保,彭东航,蒋丽忠,等. 横向地震作用下高速铁路CRTSⅢ型无砟轨道-桥梁系统震致轨道不平顺研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(8):2773-2784.
ZHOU W B,PENG D H,JIANG L Z,et al. Study on track irregularity of CRTS Ⅲ ballastless track-bridge system of high-speed railway under transverse earthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,20(8):2773-2784.

[15] 赖智鹏,蒋丽忠. 横桥向地震作用下高速铁路CRTSⅡ板式无砟轨道-桥梁系统残余变形与钢轨变形的映射模型[J]. 土木工程学报,2023,56(6):87-99.
LAI Z P,JIANG L Z. Mapping between the residual deformation in the CRTSⅡslab track-bridge system and the rail deformation under earthquake in the transverse direction[J]. China Civil Engineering Journal,2023,56(6):87-99.



第一作者:夏景辉(1969—),男,教授级高工,博士,研究方向为城市轨道工程。E-mail:87008606@qq.com。



通信作者:臧传臻(1990—),男,工程师,博士,研究方向为轨道减振降噪。E-mail:zangchuanzhen@crdc.com。

(责任编辑:李 根)