

# 考虑轨道约束的连续梁桥地震响应分析

Seismic Response Analysis of Continuous Girder Bridges Considering Orbital Constraints

杨彭钧<sup>1</sup>, 刘琦<sup>1</sup>, 吴斐璠<sup>2</sup>, 王慧东<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 北京建业通工程检测技术有限公司, 北京 100076)

**摘要:** 为研究高速铁路连续梁桥与轨道系统地震响应规律, 以某高速铁路连续梁及 T 构梁为研究对象, 建立考虑轨道约束的线桥一体化模型, 研究一致激励及非一致激励下连续梁桥无缝线路地震响应, 探讨线路纵向阻力、桥墩刚度、支座类型、行波效应对梁轨系统地震响应的影响。结果表明: 轨道约束会提升结构低阶纵向自振频率, 对结构竖向及横向频率影响较小; 轨道约束对结构内力影响较大, 墩底剪力最大减小 27.56%; 梁缝位置为钢轨不利位置; 小阻力扣件对减小钢轨纵向力有显著作用; 增加桥墩刚度可明显减小梁轨相对位移; 摩擦摆减隔震支座可明显减小连续梁固定墩墩底弯矩, 从经济角度出发可仅在主墩布置摩擦摆减隔震支座; 行波效应对轨道系统影响较大, 同时对墩底弯矩也有不同程度的影响。

**关键词:** 无缝线路; 线桥一体化模型; 梁轨系统; 地震响应; 行波效应

**中图分类号:** U441.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0125-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.023

YANG Pengjun<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, WU Feifan<sup>2</sup>, WANG Huidong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Beijing Jianyetong Engineering Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to study the seismic response law of continuous girder bridge and track system of high-speed railway, an integrated model of line and bridge considering track constraints is established with continuous beams and T-beams of a high-speed railway as the research objects, and the seismic response of seamless lines of continuous girder bridges under consistent excitation is studied, the effects of longitudinal resistance, pier stiffness and support type on the seismic response of beam-rail system were discussed. The results show that the track constraint will increase the low-order longitudinal self-vibration frequency of the structure, which has less effect on the vertical and transverse frequencies of the structure; the orbit constraint has a greater impact on the internal force of the structure, and the shear force at the bottom of the pier is reduced by 27.56%; the position of the beam joint is the unfavorable position of the rail; the small resistance fastener has a significant effect on reducing the longitudinal force of the rail; the stiffness of the pier can significantly reduce the relative displacement of the beam rail; the friction swing isolation bearing can significantly reduce the bending moment of the bottom of the continuous beam fixed pier, and the friction swing damping isolation bearing can be arranged only on the main pier from the economic point of view; The traveling wave effect has a greater impact on the track system, and at the same time has different degrees of influence on the bending moment of the pier bottom.

**Keywords:** seamless lines; line-bridge integrated model; beam-rail system; seismic response; traveling wave effect

**作者简介:** 杨彭钧 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁结构与施工技术。

**通信作者:** 王慧东 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 桥梁工程教学与科研工作。

**收稿日期:** 2023-10-26

## 0 引言

无缝线路具有平顺性好、舒适度高等优点, 非常符合高速列车的运行需求。此外, 在经济性上无

## 道桥技术

无缝线路相比于有缝线路优势明显,因此其在高速铁路轨道结构中的应用越来越广泛。高速铁路建设过程中为了节约耕地、减少路基沉降、保证运营过程中的平稳性和安全性,常采用“以桥代路”的模式,大范围采用桥梁代替路基作为轨道的支撑结构<sup>[1]</sup>。由此产生的无缝线路和高铁桥梁之间的相互作用问题在高速铁路设计过程中不可忽视。

桥上铺设无缝线路时,桥上及其附近的钢轨连续焊接,钢轨无法自由伸缩。在温度、徐变、制动力和地震作用下,桥梁和无缝线路之间会产生相对位移,由于扣件、轨道板/道床等约束作用,桥梁和轨道之间产生方向相反大小相等的纵向力。该纵向力既会对轨道强度和稳定性造成影响,也会通过梁体传递到支座、桥墩和基础,从而影响桥梁下部结构安全。

Maragakis<sup>[2]</sup>测定了有砟轨道桥 Strawberry Park 的频率及阻尼特性,结果表明轨道约束下结构纵横向及竖向基频相对于无约束时减小,但是会增强相邻路基的振动效果; Petrangeli<sup>[3]</sup>建立了梁轨相互作用下的某刚构桥抗震计算模型,得出轨道约束能有效地抑制桥墩的地震损伤;黄艳等<sup>[4]</sup>采用非线性弹簧单元模拟道床的纵向位移阻力关系,建立了地震作用下梁轨共同作用的线桥一体化模型,结果表明桥墩刚度相差较大时,轨道约束的影响较显著;严猛等<sup>[5]</sup>以某有砟轨道大跨桥梁为研究对象,分析了一致激励下桥上无缝线路纵向地震响应,研究了小阻力扣件铺设、梁体温差及地震波频谱特性对钢轨最大纵向力的影响;谢旭等<sup>[6]</sup>采用非线性弹簧单元模拟道床纵向位移阻力关系,研究了高速铁路 32 m 简支梁采用不同减隔震装置时的弹塑性地震响应;黄宇辰等<sup>[7]</sup>研究了两种不同形式的 CRTS II 板式无砟轨道系统约束下一典型 5 跨 FPS 隔震简支梁桥的纵向地震响应,探究了滑动层摩擦系数、剪力齿槽刚度等参数对其抗震性能的影响;石岩等<sup>[8]</sup>针对某大跨铁路连续梁拱桥,建立了考虑轨道约束和碰撞效应的动力分析模型,探究了轨道约束和拱肋对桥梁地震响应的影响。以上对于梁轨系统地震响应的研究均基于一致激励,梁轨耦合作用下,行波效应会对桥梁及轨道结构内力产生影响,但这方面研究较为缺乏。

以连锁铁路某特大桥为背景,桥跨布置形式为

2×64 m T 构梁+ (72+120+72) m 连续梁桥,建立考虑轨道约束的高速铁路连续梁桥线桥一体化模型,研究一致激励下高铁桥梁无缝线路地震响应,分析不同小阻力扣件布置方案、桥墩刚度、支座类型对结构地震响应的影响;非一致激励下行波效应对梁轨系统地震响应的影响。

## 1 线桥一体化地震反应分析模型

### 1.1 桥梁概况

为研究轨道约束对桥梁结构地震响应的影响,以连锁铁路跨京沪高速特大桥为研究对象,桥跨布置形式为:2×64 m T 构梁+ (72+120+72) m 连续梁桥,采用单箱单室箱型截面,T 构梁梁体采用 C50 混凝土,连续梁梁体采用 C55 混凝土。T 构梁桥面宽度为 7.6 m,跨中梁高为 4.3 m,支点梁高为 7 m;连续梁桥面宽度为 8.5 m,跨中梁高为 5 m,支点梁高为 9 m。箱梁截面尺寸如图 1 所示。

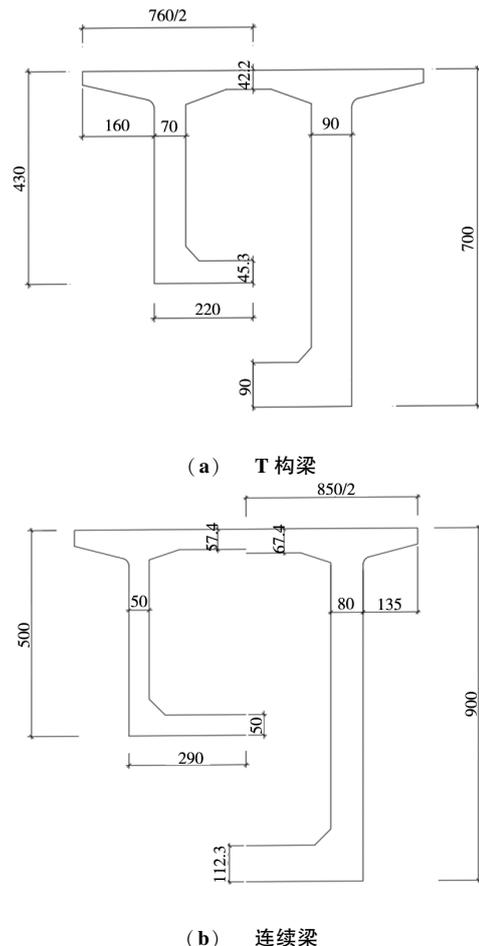


图 1 T 构梁+连续梁截面尺寸

Fig. 1 T beam + continuous beam section dimensions

梁底按二次抛物线渐变，下部为实腹轨道型桥墩，采用球形钢支座，19号墩为固定墩。T构梁二期恒载按115.9 kN/m计，连续梁二期恒载按120.5 kN/m计。桥上铺设单线有砟轨道，钢轨为60 kg/m钢轨、II型混凝土轨枕。采用常阻力扣件时，线路纵向阻力取15 kN/(m·轨)，极限位移取2 mm；铺设小阻力扣件时，线路纵向阻力取8 kN/(m·轨)<sup>[9]</sup>，极限位移取0.5 mm。

桥址场地类别为II类，地震设防烈度为7度，水平地震加速度峰值为0.15g，特征周期为0.45 s。输入地震波为El-Centro波，对该波进行调幅修正，修正后波形（最大幅值为0.15g）如图2所示。（共选取了3条波进行分析，计算结果略有差异，规律具有普遍性，受篇幅限制此处仅列出El-Centro波下的地震响应。采用Newmark-β法计算该桥的地震响应，采用Rayleigh阻尼，阻尼比 $h$ 为0.05<sup>[10]</sup>。

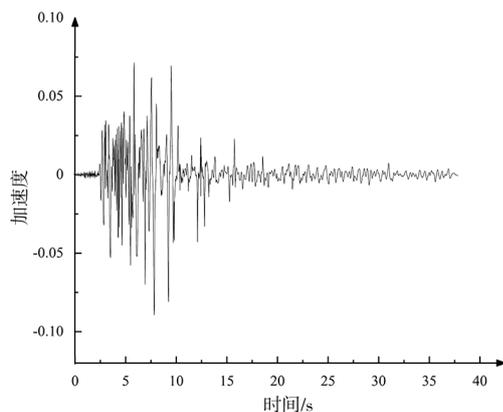


图2 El-Centro地震波  
Fig. 2 El-Centro seismic waves

## 1.2 基本假定

(1) 线路纵向阻力与位移为理想弹塑性本构关系，不考虑阻尼效应的影响。假设轨道与桥梁不产生横向相对位移。

(2) 主要讨论多遇地震作用下桥梁的地震反应，假定各部件间摩擦效应未发挥或发挥尚不充分，桥梁减隔震支座的参数根据设计取值；假设固定支座能完全阻止该处梁体与墩顶的相对位移。

(3) 将桥墩简化为变截面弹性欧拉梁单元，不考虑桩土作用，墩底截面采用固定约束。

(4) 不考虑相邻桥跨之间的碰撞效应。

## 1.3 计算模型

线桥一体化模型中，采用非线性弹簧模拟线路

纵向阻力；竖向采用线性弹簧模拟道床竖向刚度；钢轨、梁、桥墩采用梁单元模拟；轨道边界条件以路基上一定长度轨道作为计算长度，中路基段长度取100 m。线桥一体化模型如图3所示。

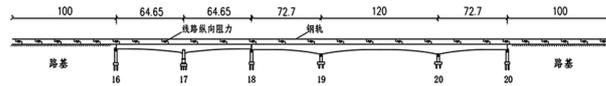


图3 线桥一体化模型  
Fig. 3 Line-bridge all-in-one model

## 2 轨道对桥梁自振特性的影响

基于上述线桥一体化模型，以桥上铺设常阻力扣件为例，对不考虑轨道约束作用和考虑轨道约束两种情况下桥梁进行动力特性分析，取前10阶振型比较，结果见表1。

表1 自振特性对比

Table 1 Comparison of self-resonance characteristics

阶数	无轨道约束		有轨道约束	
	频率/Hz	振型特征	频率/Hz	振型特征
1	1.060	连续梁纵飘	1.139	连续梁纵飘
2	1.193	连续梁纵飘	1.212	连续梁纵飘
3	1.280	连续梁横弯	1.278	连续梁横弯
4	1.291	刚构桥纵飘	1.488	刚构桥纵飘
5	1.543	刚构桥横弯	1.542	刚构桥横弯
6	2.110	刚构桥横弯	2.110	刚构桥横弯
7	2.305	连续梁竖弯	2.310	连续梁竖弯
8	2.363	连续梁、刚构桥横弯	2.362	连续梁、刚构桥横弯
9	2.390	连续梁、刚构桥横弯	2.389	连续梁、刚构桥横弯
10	2.840	刚构桥竖弯	2.881	刚构桥竖弯

由表1可知，考虑轨道约束后，结构的第一、四阶振型变化较大，第一、第四阶振型为连续梁和T构梁沿纵桥向的刚体运动，由于桥上无缝线路的纵向约束作用，提升了系统的纵向刚度，结构自振频率增大，但结构振型相似。轨道结构所提供的横向及竖向刚度相对于桥梁结构来说微乎其微，因此轨道约束对桥梁结构横向及竖向变形的影响较小。

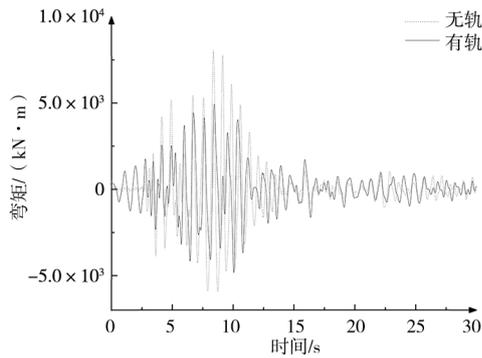
## 3 地震作用下梁轨系统响应

### 3.1 轨道对结构内力的影响

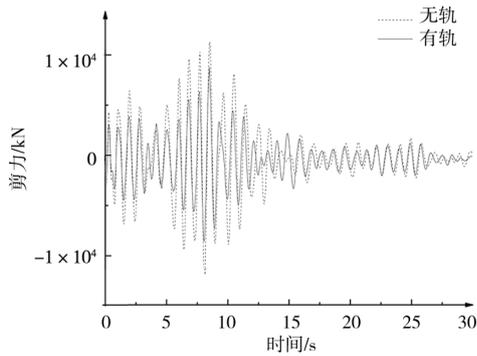
为研究轨道对桥梁结构内力的影响，对有无轨道约束时T构梁主墩（17#墩）、连续梁桥固定墩（19#墩）墩底剪力以及墩底弯矩进行比较，结果如图4、图5所示。

道桥技术

由图 4、图 5 可知，考虑轨道约束后地震作用下 17#、19#墩墩底弯矩及墩底剪力显著减小，其中 17#墩底弯矩最大减小 23.17%，墩底剪力最大减小 21.54%、19#墩底弯矩最大减小 25.02%，墩底剪力最大减小 27.56%。说明轨道约束对地震作用下的固定墩内力有耗散作用，可以为桥梁结构分担部分地震力，对于地震频发地区的桥梁进行抗震设计时应当考虑轨道约束的影响。

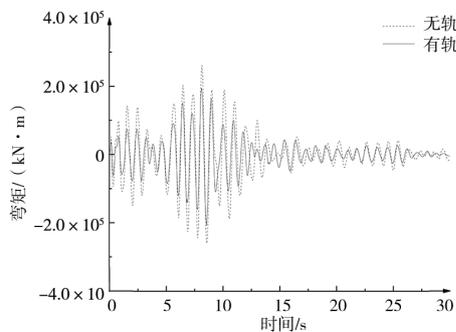


(a) 墩底弯矩

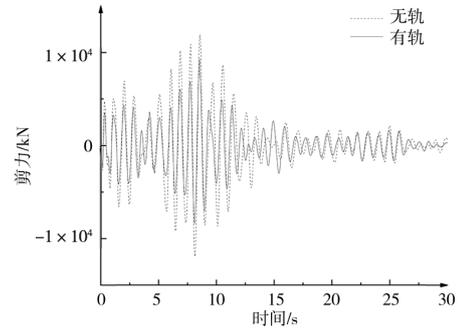


(b) 墩底剪力

图 4 17#墩底内力对比  
Fig. 4 Comparison of internal forces of pier 17#



(a) 墩底弯矩



(b) 墩底剪力

图 5 19#墩内力对比  
Fig. 5 Comparison of internal forces of pier 19#

3.2 轨道对结构位移的影响

为研究轨道对桥梁结构位移的影响，对是否考虑轨道约束时连续梁固定墩墩顶位移进行比较，结果如图 6 所示。

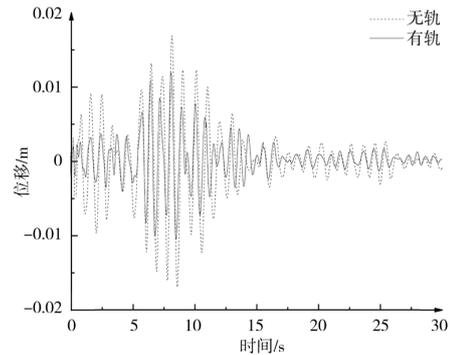


图 6 墩顶位移对比

Fig. 6 Pier top displacement comparison

由图 6 可知，考虑轨道约束后连续梁固定墩墩顶位移最大减小 17.43%，说明轨道结构对桥梁地震位移响应有一定的影响。

3.3 地震作用下轨道响应

为研究轨道结构在地震荷载作用下的响应，分别取 3 个梁缝、各墩墩顶、连续梁跨中位置处最大钢轨纵向力见表 2。梁缝位置是桥上无缝线路地震荷载作用下的不利位置，墩顶及跨中位置处钢轨纵向力明显小于梁缝位置处，梁缝位置轨纵向力如图 7 所示。

表 2 关键位置钢轨最大纵向力

Table 2 Maximum longitudinal force of the rail in critical positions

位置	纵向力/kN	位置	纵向力/kN
左梁缝	585.58	17#墩顶	129.39
中间梁缝	903.89	19#墩顶	254.34
连续梁跨中	280.67	20#墩顶	253.75
右梁缝	804.01		

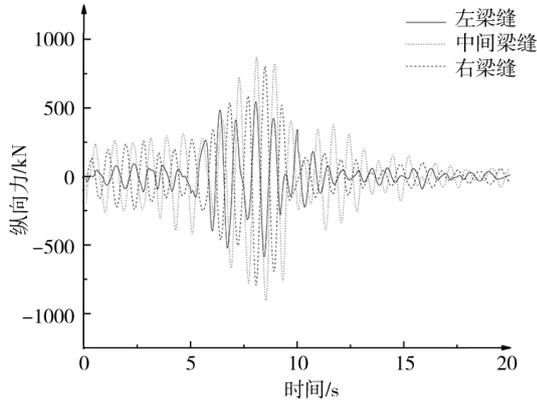


图7 梁缝位置钢轨纵向力

Fig. 7 Rail longitudinal force at beam seam position

由上述结果可知，连续梁右侧梁缝位置处的钢轨纵向力明显高于其他位置。3个梁缝位置处的最大钢轨纵向力分别为 585.58、903.89、804.01 kN，远大于对应位置处根据现行规范计算所得到的钢轨伸缩力，因此对于穿越地震区无缝线路应进行地震力验算。

#### 4 设计参数对地震响应的影响

##### 4.1 小阻力扣件布置方式

小阻力扣件主要通过减小螺栓紧固扭矩和减小钢轨底部和轨下胶垫间的摩擦力来达到减小扣件纵向阻力的效果。在大跨度连续梁上为了减小梁轨之间的相互作用满足轨道稳定性和强度要求，常采用小阻力扣件来减小桥梁和钢轨受力。

由上述结果可知钢轨峰值应力多出现在梁缝位置处，因此布置小阻力扣件的主要目的是减小梁缝位置处的钢轨纵向力。采用表3所示的小阻力扣件布置方案，比较各方案下钢轨纵向力及位移，最大钢轨纵向力如图8所示。

表3 小阻力扣件布置方案

Table 3 Small resistance fastener arrangement scheme

方案编号	小阻力扣件布置方案
一	全线铺设
二	连续梁范围铺设
三	连续梁中跨铺设
四	T 构全跨、连续梁边跨铺设

由上述结果可知，采用表3小阻力扣件布置方案后地震作用下梁缝位置处最大钢轨纵向力相比于铺设常阻力扣件时均有不同程度的减小，因此小阻力扣件可以有效改善无缝线路受力状态。

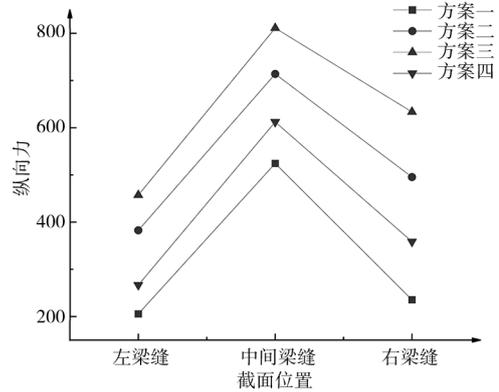


图8 最大钢轨纵向力

Fig. 8 Maximum rail longitudinal force

##### 4.2 桥墩刚度的影响

为了解桥墩刚度对梁轨系统地震相应的影响，不改变桥墩的截面特性，仅对连续梁固定墩高度做出调整，所采取桥墩高度为 15、45 m，设计墩高 22 m。对连续梁固定墩墩底弯矩及连续梁左端位置梁轨相对位移进行对比。

连续梁固定墩墩底弯矩如图9所示，由图9可以看出，随着桥墩刚度的增加，固定墩墩底弯矩明显增大。图10显示了桥墩刚度变化对连续梁左端位置处梁轨相对位移的影响。由图10可以看出随着桥墩刚度的增加，连续梁左端的梁轨相对位移显著减少。

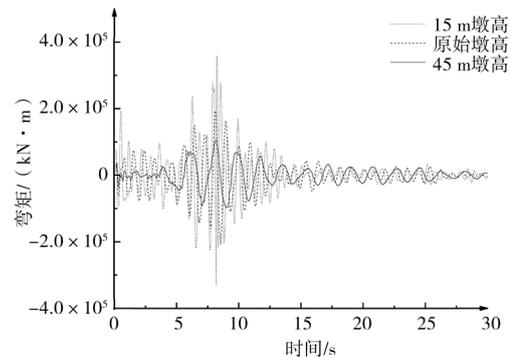


图9 固定墩墩底弯矩

Fig. 9 Fixed pier bottom bending moment

##### 4.3 支座类型的影响

摩擦摆减隔震球形支座在地震荷载作用时会剪短支座剪力螺栓，通过滑动的界面摩擦耗散地震能量，达到减震目的，与钟摆原理相同。为研究支座类型对梁轨系统地震相应的影响，针对连续梁采用如下三种支座布置方案。方案一：全部采用球形钢

道桥技术

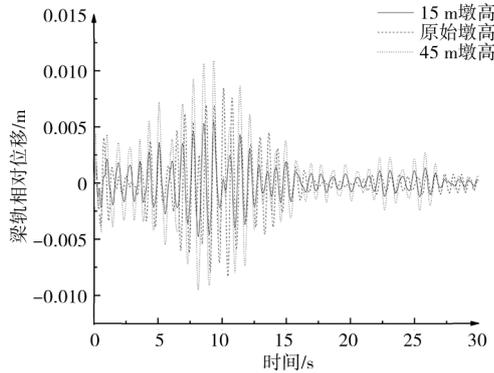


图 10 梁轨相对位移

Fig. 10 Beam rail relative displacement

支座；方案二：主墩和边墩支座均采用减隔震支座；方案三：主墩支座采用减隔震支座。不同布置方案下连续梁固定墩墩底弯矩如图 11 所示。

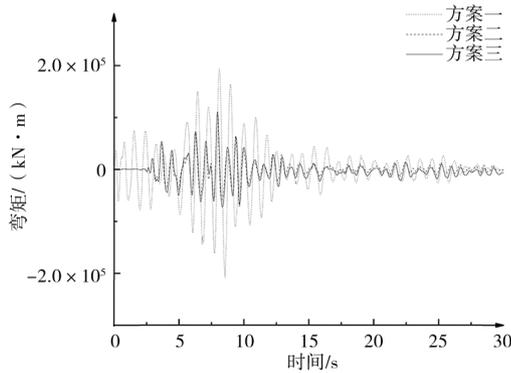


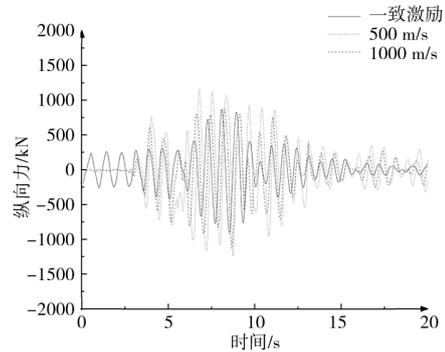
图 11 支座对固定墩墩底弯矩的影响

Fig. 11 Influence of the support on the bending moment of the fixed pier bottom

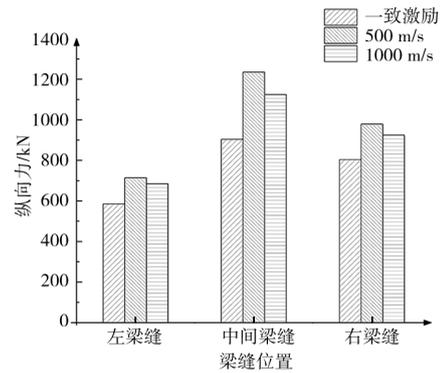
由图 11 可知采用摩擦摆减隔震支座后，连续梁固定墩弯矩明显减小，方案二与方案三下的减隔震支座布置方案对于减小固定墩墩底内力有相当的效果，从经济角度出发可选择仅在主墩布置摩擦摆减隔震支座。

4.4 行波效应的影响

对于大跨度桥梁，地震波沿纵桥向传播到各支承点时存在时间差和相位差，因此行波效应对大跨度桥梁结构的地震响应存在较大影响<sup>[11]</sup>。为了解行波效应对大跨桥梁梁轨系统地震相应的影响，通过改变地震波视波速对轨道及墩底弯矩进行对比。本文视波速选取 500、1000 m/s。梁缝位置处的钢轨纵向力各桥墩墩底弯矩如图 12、图 13 所示。



(a) 中间梁缝位置钢轨纵向力历程



(b) 梁缝位置处钢轨纵向力

图 12 行波效应对钢轨纵向力的影响  
Fig. 12 Influence of traveling wave effect on the longitudinal force of a rail

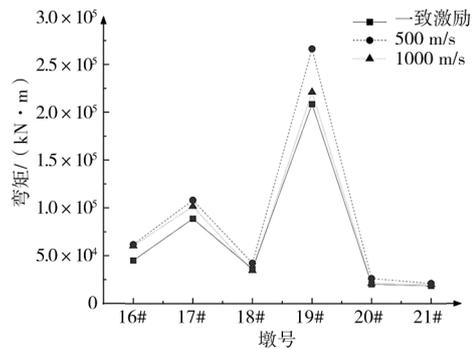


图 13 行波效应对墩底弯矩的影响

Fig. 13 Influence of traveling wave effect on the bending moment at the bottom of the pier

由图 12 可知，轨道系统受行波效应影响较大，视波速为 500 m/s 时，中间梁缝位置处钢轨纵向力最大增加 336 kN，其他梁缝位置处钢轨纵向力也有不同程度增加。由图 13 可知视波速对墩底弯矩有一定影响，其影响与地震波行进距离有关，通过改变各支承处地震波相位进而影响墩底弯矩。

## 5 结论

以连锁客专一大跨桥梁为例, 研究了连续梁桥无缝线路地震响应, 并对相关设计参数对地震相应的影响进行了分析。主要得出以下结论:

(1) 轨道约束会提升结构低阶纵向自振频率, 对结构竖向及横向频率影响较小。

(2) 地震激励下轨道约束对主梁及墩台影响较大, 固定墩墩底内力和墩顶位移分别最大减小 27.56% 和 17.43%。

(3) 地震作用下梁缝位置处钢轨纵向力最大, 远大于按现行规范计算得到的对应位置处的钢轨伸缩力。

(4) 小阻力扣件可以明显改善桥上无缝线路受力状态。

(5) 采用摩擦摆减隔震支座可明显减小连续梁固定墩墩底弯矩, 从经济角度出发可选择仅在主墩布置摩擦摆减隔震支座。

(6) 轨道系统对行波效应较为敏感, 考虑行波效应的梁轨系统地震响应, 应重点关注轨道系统; 行波效应通过改变各支承处地震波相位, 进而墩底弯矩产生影响。

## 参 考 文 献

[1] 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 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.

- [2] MARAGAKIS E, DOUGLAS B, HAQUE S. Full-scale response test of a railway bridge. In: structures congress-proceeding. ASCE, 1996: 183-190.
- [3] PETRANGELI M, TAMAGNO C, TORTOLINI P. Numerical analysis of track: structure interaction and time domain resonance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222 (4): 345-353.
- [4] 黄艳, 阎贵平, 刘林. 轨道约束对铁路桥梁纵向地震反应特性的影响 [J]. 铁道学报, 2002 (5): 124-128.
- [5] 严猛, 魏贤奎, 王平, 等. 大跨桥上无缝线路纵向地震响应研究 [J]. 铁道学报, 2014, 36 (5): 96-102.
- [6] 谢旭, 王炎, 陈列. 轨道约束对铁路减隔震桥梁地震响应的影响 [J]. 铁道学报, 2012, 34 (6): 75-82.
- [7] 黄宇辰, 王军文, 王少君. 无砟轨道约束对高铁 FPS 隔震筒支梁桥纵向地震反应的影响 [J]. 铁道建筑, 2015 (9): 24-28.
- [8] 石岩, 赵翔宇, 焦应乾, 等. 考虑轨道约束的连续梁拱桥地震反应及减震控制研究 [J]. 世界地震工程, 2022, 38 (1): 148-157.
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB10015-2012 铁路无缝线路设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [10] 戴公连, 汪禹. 考虑轨道约束的大跨梁拱组合桥地震响应研究 [J]. 铁道工程学报, 2016, 33 (1): 70-74, 86.
- [11] 刘旭政, 王鹏. 行波效应对长跨连续刚构桥地震响应的影

响 [J]. 华东交通大学学报, 2018, 35 (1): 20-26.

(上接第 110 页)

式可作为西南酸雨地区腐蚀结构的防护提供指导。

## 参 考 文 献

- [1] 段颖, 李欣. 论二氧化硫排放状况及污染控制基本对策 [J]. 北方环境, 2002 (4): 13-14.
- [2] 蔡朋程. 浅析中国的酸雨分布现状及其成因 [J]. 科技资讯, 2018, (15): 127-128.
- [3] 石晋涛. 模拟酸雨环境下后张预应力体系耐久性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [4] 周勇. 既有钢筋混凝土受弯构件正截面抗弯承载力研究 [D].

长沙: 长沙理工大学, 2016.

- [5] 高向玲, 李志勇. 锈蚀钢筋混凝土受弯构件抗弯承载力评估 [J]. 结构工程师, 2016, 32 (3), 37-44.
- [6] 徐善华. 混凝土结构退化模型与耐久性评估 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [7] 混凝土结构设计规范 GB50010-2010 (2015 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] 陈晓. 不同腐蚀条件下钢筋混凝土梁力学性能试验分析 [D]. 天津: 河北工业大学, 2012.