

高速铁路曲线连续刚构桥抗震性能研究

谷传刚

(中国铁路上海局集团有限公司, 上海市 200071)

摘要: 为研究曲线连续刚构桥梁桥墩宽度对抗震设计的影响规律, 考虑桩土作用、曲线影响、地震作用对盐泰锡常宜铁路京杭运河特大桥 92 m+176 m+92 m 曲线连续刚构桥进行有限元分析, 对其在多遇地震、设计地震、罕遇地震作用下的抗震性能进行验证。结果表明, 增加桥墩宽度(宽高比)能有效提升结构整体刚度, 但会引发关键截面内力的显著重分布, 桥墩宽高比接近 0.11~0.13 时, 能有效平衡结构刚度需求和内力控制; 曲线线形会导致结构出现复杂的空间耦合响应, 有必要考虑桩土作用、曲线效应和多方向地震激励建立精细化分析模型, 优化桥墩设计。研究成果验证了该桥抗震设计的可靠性, 可为同类桥梁抗震设计提供参考。

关键词: 高速铁路; 抗震研究; 曲线连续刚构桥; 数值计算; 无砟轨道

中图分类号: U442.5*5; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0230-05

Study on Seismic Performance of Curved Continuous Rigid-frame Bridges along High-speed Railway

GU Chuangang

(China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: In order to study the influence of pier width on the seismic design of curved continuous rigid-frame bridges, and considering pile-soil interaction, curve effects and seismic actions, a finite element analysis is conducted on the (92+176+92)-m curved continuous rigid-frame bridge of Beijing-Hangzhou Grand Canal Bridge in Yancheng - Taizhou - Wuxi - Changzhou - Yixing High-speed Railway to verify its seismic performance under the actions of frequent, design-level and rare earthquakes. The results indicate that increasing the pier width (width-to-height ratio) effectively enhances the overall structural stiffness, but will lead to significant redistribution of internal forces in critical sections. When the width-to-height ratio of the pier approaches 0.11~0.13, a balance between structural stiffness requirements and internal force control can be effectively achieved. The curved alignment induces the complex spatial coupling responses of the structures, necessitating the development of refined analysis models that consider the pile-soil interaction, curvature effects and multi-directional seismic excitation to optimize the pier design. The findings validate the reliability of the seismic design for this bridge and can serve as a reference for the seismic design of similar bridges.

Keywords: high-speed railway; seismic research; curved continuous rigid-frame bridge; numerical calculation; ballastless track

0 引言

随着我国高速铁路不断织密, 线路穿越地形复杂情况日益增多。为适应路网、河网发达的地区高速铁路建设需要, 曲线连续刚构桥因其良好的地形适应性和结构整体性, 在高速铁路建设中得到了广泛应用。然而, 该类桥梁在地震作用下的动力响应

机理复杂, 尤其在地形、轨道系统约束、桥墩尺寸差异及曲线线形等多因素耦合作用下, 其抗震性能仍面临诸多挑战。

目前, 国内外学者围绕刚构桥的抗震性能已开展了一系列研究。刘尊稳等探讨了无砟轨道系统对简支+刚构梁桥地震响应的影响, 指出轨道系统对墩底弯矩和墩顶位移具有显著约束作用^[1]; 杨秀涛研究了高桩基础对双薄壁墩连续刚构桥的动力响应, 发现高桩会增强结构柔性并改变内力分布^[2]; 卢泽睿等则指出曲线桥的最不利地震输入方向并非传统的纵、横桥向, 强调了多方向激励分析的必要性^[3]。此外, 董俊等人对非规则连续刚构桥的地震易损性研究表明, 支座和墩底区域是抗震薄弱环节^[4]。

收稿日期: 2026-01-05

基金项目: 中铁上海设计院集团有限公司 2023 年度科研项目(集 23-Z05)——复杂环境条件下高速铁路轨道-桥梁结构体系形变监测与行车安全评估研究

作者简介: 谷传刚(1987—), 男, 学士, 高级工程师, 从事高速铁路建设管理工作。

然而,现有研究多集中于公路桥梁、直线桥、规则桥梁或非常规桥墩等^[5-9],且一般未考虑桩土作用对桥梁抗震性能的影响,对高速铁路曲线连续刚构桥在桩土作用、曲线效应与地震耦合作用下的系统抗震性能研究尚不充分^[10-14]。因此,本文拟分析桩土作用对曲线刚构桥的影响,系统研究高速铁路曲线连续刚构桥在地震作用下的内力分布与动力响应规律,旨在为其抗震设计提供理论依据与方法支持。

1 工程概况

本文以新建盐城经泰州无锡常州至宜兴铁路(泰州至宜兴段)京杭运河特大桥主桥为例进行分析。如图1所示,主桥为92 m+176 m+92 m无砟轨道预应力混凝土连续刚构桥,全长361.5 m,设计速度为250 km/h(本桥限速200 km/h),CRTSⅢ型板式无砟轨道。桥梁位于曲线上,左线曲线半径2 100 m,右线2 104.6 m,采用“曲梁曲做”设计(见图2)。

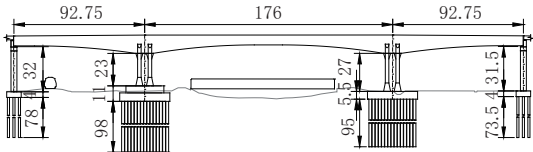


图1 纵向布置图(单位:m)

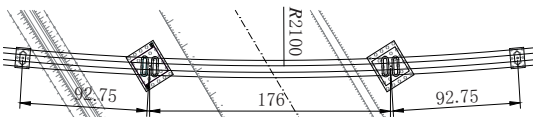


图2 平面布置图(单位:m)

梁体结构为单箱单室变截面箱梁,顶板宽12.2 m,底板宽8.4 m,中支点梁高13 m,跨中梁高7m,梁底线形按二次抛物线变化,全桥顶板厚55~65 cm,底板厚53~150 cm,腹板厚度60~90~120 cm。主墩为双肢板式墩,与梁体固结,墩高分别为23 m和27 m,单肢墩为11.9 m×2.5 m圆端形墩,主墩基础采用30- ϕ 2.0 m钻孔桩。梁端每侧设置纵向活动支座、横向活动支座各一个,相邻简支梁近侧设固定支座,远侧设置活动支座。列车活载采用ZK标准荷载,二期恒载135 kN/m,考虑温度、风载、制动力、地震作用等附加荷载。地震动峰值加速度0.10g,场地类别为Ⅲ类,特征周期0.45 s,考虑调整系数1.25。主梁采用C60混凝土,1 860 MPa钢绞线,下部结构见表1。

2 有限元模型

2.1 模型介绍

采用MIDAS Civil NX 2025程序进行结构分析计

表1 设计参数表

项目	主墩		边墩	
	桥墩	桩基	桥墩	桩基
材料	C50	水下C40	C35	水下C35
截面/m	11.9×2.5 (圆端形)	ϕ 2.0	10.6×4.2 (圆端形)	ϕ 1.5
主筋/mm	4肢 ϕ 32 共736根	64 ϕ 32	2肢 ϕ 32 共336根	42 ϕ 22
保护层/mm	40	70	45	70

算,共有4 456个节点,4 341个梁单元。模型中梁与墩、墩与承台、承台与桩顶均采用刚性连接模拟,支座采用弹性连接模拟,桩底节点采用一般支撑-固定模拟。主梁、桥墩、承台、桩基础等均采用空间梁单元模拟;支座简化为等效线性弹簧,采用弹性连接模拟;桩土相互作用根据“m”法采用节点弹性支承模拟,取 $m_{动}=(2\sim3)m_{静}$;二期恒载、横梁自重和列车活载作为梁单元附加质量考虑;研究对象两侧各建一跨桥梁以反映邻跨的边界效应。采用时程分析法,详见章节4,分别施加顺桥向地震(主桥两端桥墩中心连线方向)、横桥向地震(垂直于主桥两端桥墩中心连线方向)。

2.2 自振特性分析

根据上述模型进行结构动力特性分析,顺桥向X、横桥向Y、竖向Z分别添加50阶初始向量,3个方向上振型参与质量均达到100%,表2为前6阶动力特性。

表2 动力特性表

振型	振型特性	自振频率/ Hz	自振周期/ s
1	小里程侧边墩纵向弯曲	0.653	1.530
2	主梁一阶横弯	0.759	1.318
3	小里程侧边墩横弯	0.835	1.197
4	大里程侧边墩横弯	0.844	1.185
5	主墩纵向弯曲,主梁反对称竖弯	0.960	1.041
6	大里程侧边墩纵向弯曲	1.088	0.919

如图3所示,结构的第一阶振型为小里程侧边墩的纵向弯曲,在顺桥向,边墩是该连续刚构桥抗震体系中的相对柔性环节,其刚度对整个结构的纵向基本周期起到了控制作用。第二阶振型表现为主梁的一阶横弯,在横桥向,主梁的横向刚度相较于桥墩而言更为柔性的特性开始显现,这对于曲线梁桥在横向地震作用下的响应至关重要。从周期分布来看,结构前几阶周期分布较为密集,且各阶振型体现出明显的空间耦合特征,尤其是对于本工程所在的曲线桥梁,其扭转振动与平动、弯曲振动

必然相互耦合。



图3 振型特性

3 参数比较

双肢薄壁墩作为连续刚构桥的重要传力构件,工程中既要有较小的纵向刚度,以满足桥梁变形需要,又要有较大的截面尺寸,以满足墩身受力需要,而单肢墩桥墩宽度是平衡纵向刚度和墩身受力的关键参数,本节旨在分析曲线连续刚构桥在地震作用下桥墩宽度对内力响应与变形行为的影响规律,为优化设计提供数据支撑。

3.1 内力响应

如图4所示,在顺桥向地震力作用下,跨中弯矩(本文所述弯矩均为 M_y)随桥墩宽度增加而持续显著增长,从1.5 m时的243 250 kN·m增至3.5 m时的327 384 kN·m,增幅达34.6%,墩底弯矩随桥墩宽度增加呈波动上升的趋势,从198 051 kN·m增至252 227 kN·m,增幅达27.4%,增加桥墩宽度极大地增强了顺桥向的整体刚度,促使跨中和墩底弯矩显著增大,同时也改变了墩梁之间的弯矩分配,使更多的地震力由主墩传递至主梁,导致主梁跨中弯矩较墩底增加更显著。在横桥向地震力作用下,跨中弯矩随桥墩宽度增加而持续显著增长,从1.5 m时的117 463 kN·m增至3.5 m时的157 637 kN·m,增幅达34.2%,墩底弯矩随桥墩宽度增加而急剧减小,从133 217 kN·m降至53 060 kN·m,降幅高达60.2%,增加桥墩宽度能极其有效地减小主墩弯矩响应,但横桥向地震力引起的跨中和墩底弯矩整体水平较纵桥向地震力小得多,跨中弯矩前者约是后者的0.5倍,墩底弯矩前者是后者的0.67~0.21倍,对结构设计不

起控制作用。在各种工况下,不同桥墩宽度对应的墩身轴力逐渐增加,但变化幅度极小,变化率小于1.5%;不同桥墩宽度对应的跨中轴力逐渐减小,变化幅度极小,变化率小于3.8%,桥墩宽度变化对结构恒载及地震引起的轴力重分布影响不大,轴力大小主要由恒载决定。因此,对曲线双肢薄壁墩连续刚构桥,顺桥向地震力作用桥墩宽度增大会导致桥梁重要截面弯矩增大,对设计起控制作用。

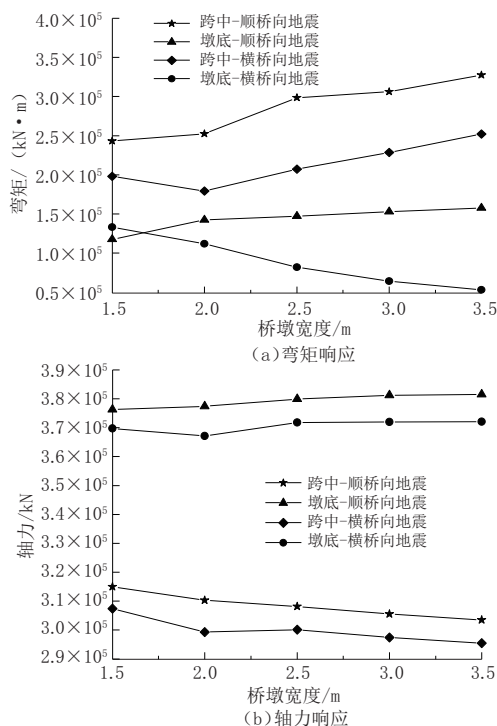


图4 设计地震结构内力响应

3.2 位移响应

如图5所示,在顺桥向地震下,跨中纵向位移随桥墩宽度增加从44.3 mm显著减小至34.9 mm,增加桥墩宽度能有效控制主梁在纵向的位移,但当桥墩宽度不小于2.5 m后,继续增加桥墩宽度,主梁纵向位移基本保持不变;桥墩宽度对跨中横向位移的影响表现出一致的规律,当桥墩宽度不小于2.0 m后,继续增加桥墩宽度,主梁横向位移变化极小。墩底纵向位移随桥墩宽度增加而小幅增大,这与墩身刚度增大后,变形曲线曲率改变,底部相对位移增加有关。横桥向位移,呈现“刚性”饱和趋势。在横桥向地震下,墩底位移基本稳定,跨中位移随桥墩宽度增加并未减小,反而在58~61 mm范围内略有波动并呈微增趋势。因此,增加桥墩宽度对抑制横向位移的效果不显著,对抑制纵向位移有明显效果,但当桥墩宽度达到一定值后,对本桥而言,桥墩宽度大于2.5 m后,继续提高桥墩宽度对降低位移无效。

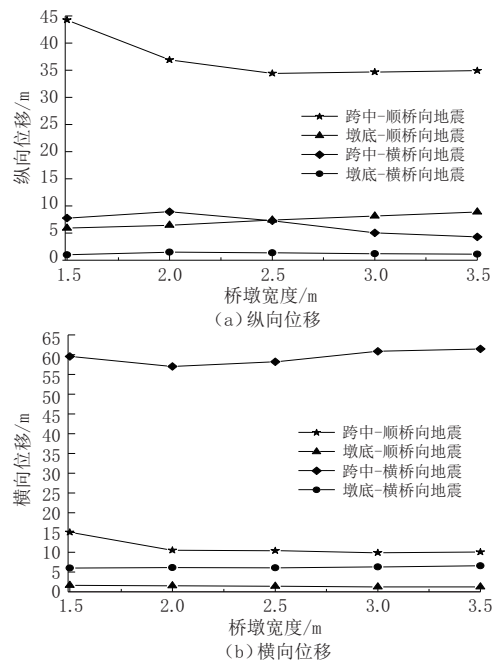


图5 设计地震结构位移响应

增加桥墩宽度,本质上是增加桥墩宽高比,增强主墩及结构的整体刚度。这带来了一系列复杂的连锁效应,既能有效控制了主梁的顺桥向位移,保持地震作用下桥梁合理变形,又会急剧增大了桥墩和主梁弯矩,对连续刚构桥设计产生不利影响。对桥梁位移的控制效果存在饱和点,过度增加桥墩宽度效率低下。数据显示,当桥墩宽高比大于0.11时,主梁弯矩仍在显著增长,但对位移的控制已收效甚微。因此,对该曲线连续刚构桥梁,桥墩宽高比0.11~0.13是一个理想桥墩设计参数取值范围。

4 抗震检算

根据《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)(2009年版)第3.0.1A条,本工程桥梁抗震设防分类为B类桥梁,地震动峰值加速度 A_g 为 $0.10g$,反应谱特征周期为 0.45 s 。对本工程连续刚构分别采用50年超越概率63%、10%和2%作为多遇地震、设计地震和罕遇地震作用进行抗震设防,地震作用重要性系数分别为1.5、1.0和1.0,分别采用3组时程波,按最大值检算。如图6所示,多遇地震水平向峰值加速度为 $0.045g$,设计地震水平向峰值加速度为 $0.135g$,罕遇地震水平向峰值加速度为 $0.23g$,结构阻尼比为0.05。

如表3所示,主墩在设计地震下,顺桥向与横桥向的混凝土压应力分别为 17.93 MPa 和 10.59 MPa ,钢筋应力分别为 138.63 MPa 和 84.27 MPa ,均远低于规范容许值。这表明结构在设防地震水平下,材料强

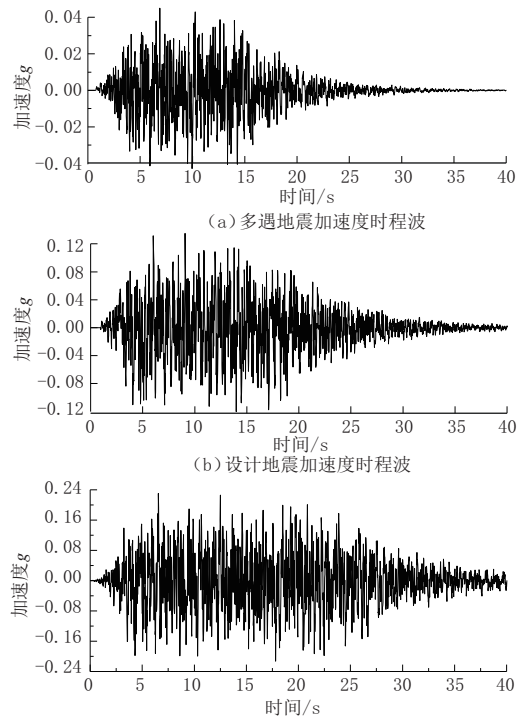


图6 地震动加速度时程曲线

度利用率合理,仍保留有充足的弹性裕度。桩基最大应力低于 8.39 MPa ,应力水平较低。单桩竖向承载力验算中,最不利轴力与承载力的比值均大于1.15,这不仅满足了规范的安全要求,更体现了基础设计具有显著的安全储备,是整体结构安全的坚实基础。

表3 设计地震作用组合下桥梁响应

部位	项目	顺桥向地震	横桥向地震
桥墩	最大弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	134 771	373 674
	最大轴力/ kN	125 682	111 379
	混凝土应力/ MPa	17.93	10.59
	钢筋应力/ MPa	138.63	84.27
	稳定性	4.65	4.78
桩基	最大弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	2 812	2 638
	最大轴力/ kN	17 368	20 881
	混凝土应力/ MPa	7.65	8.39
	钢筋应力/ MPa	59.63	65.71
	稳定性	5.04	5.98
单桩	最不利轴力/ kN	22 510	22 768
	单桩承载力/ kN	26 347	26 347
	比值	1.17	1.16

如表4所示,截面弯矩与等效屈服弯矩的比值,桥墩为1.65~1.74,桩基为2.06~2.52,均大于1,表明即使在极罕遇地震下,结构的核心抗侧力体系仍完全处于弹性工作状态。

本结构实现了高于规范的“弹性设计”的抗震性能目标。极大地保证了在罕遇地震后,桥梁主体结

表4 罕遇地震作用组合下桥墩屈服判定

部位	项目	顺桥向地震	横桥向地震
桥墩	最大弯矩/(kN·m)	198 848	372 701
	屈服弯矩/(kN·m)	328 211	1 303 289
	比值	1.65	1.74
	是否屈服	否	否
桩基	最大弯矩/(kN·m)	5 126	4 339
	屈服弯矩/(kN·m)	10 543	10 914
	比值	2.06	2.52
	是否屈服	否	否

构无需大规模修复即可维持使用功能,显著提升了结构的韧性和震后可用性,同时也避免了复杂的延性构造细节设计,实现了“小震完好、中震可修、大震弹性且损伤可控”的高性能目标。其在罕遇地震下的卓越弹性性能,为同类大跨度铁路桥梁的抗震设计提供了优秀的范本。

5 结 语

(1)对曲线连续刚构桥,增加桥墩宽高比在提升结构整体刚度的同时,会引发关键构件内力响应重分布,顺桥向地震力作用下显著提高关键截面弯矩,同时能有效控制主梁的顺桥向位移,当桥墩宽高比大于0.11时,主梁弯矩仍在显著增长,但对位移的控制已收效甚微,桥墩宽高比接近0.11~0.13时,桥墩设计参数取值较为理想,能有效平衡结构设计时的刚度和内力。

(2)曲线线形会导致结构振型表现出明显的弯-扭-翘耦合特征,传统的单向地震分析已不适用,有必要进行精细化建模分析,综合考虑桩土作用、曲线效应和多方向地震激励,以优化桥墩尺寸平衡内力

与位移响应。

(3)92 m+176 m+92 m无砟轨道预应力混凝土连续刚构桥双肢薄壁墩单墩宽度2.5 m取值合理。该结构抗震实现了高于规范基本要求的设防目标,可为同类桥梁设计提供技术参考。

参考文献:

[1] 刘尊稳,李欣婧,陈兴冲,等.无砟轨道铁路简支+刚构布置梁桥抗震设计[J].铁道工程学报,2025,42(5):43-49.

[2] 杨秀涛.高桩基础双薄壁墩连续刚构桥的地震响应研究[J].城市道桥与防洪,2025(1):101-105;109.

[3] 卢泽睿,宋郁民.不同地震激励方向的曲线连续刚构桥动力响应分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(5):192-198.

[4] 董俊,单德山,张二华,等.非规则连续刚构桥地震易损性分析[J].西南交通大学学报,2015,50(5):845-851;878.

[5] 常亚辉,任辉.地震作用下新型格构式高墩力学性能与损伤特性研究[J].铁道建筑技术,2025(6):77-80.

[6] 邢江.单线铁路高低墩大跨连续刚构桥受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[7] 饶建雄.高墩大跨连续刚构桥抗震设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[8] 邓开来,吴光源,远全闯,等.高铁大跨双肢墩连续刚构桥减震系梁地震易损性分析[J].桥梁建设,2024,54(3):61-69.

[9] 雷虎军,朱广平,陈奕涵,等.近断层地震作用下高速铁路大跨连续刚构桥易损性研究[J].中国铁路,2024(2):46-54.

[10] 束景晓,梁岩,童明娜,等.考虑桩土相互作用的近海刚构桥全寿命地震易损性分析[J].自然灾害学报,2024,33(5):146-156.

[11] 陈晓栋.连续刚构桥考虑约束扭转的动力(地震)响应[J].铁道建筑,2005(6):5-8.

[12] 张滔.双薄壁墩连续刚构桥抗震分析[J].城市道桥与防洪,2016(11):60-62;87.

[13] 陈志伟,蒲黔辉,贾宏宇,等.基于场地效应的高墩大跨铁路桥梁地震响应分析[J].世界地震工程,2016,32(2):82-88.

[14] 徐斌.高墩大跨连续刚构桥的设计及关键技术研究[J].铁道建筑,2015(6):10-13.