

DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.251182

近断层高速铁路连续梁桥减隔震研究

杨国静¹, 张素杰¹, 寇培培¹, 郑 伟²

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300308; 2. 广东广湛铁路有限责任公司, 广东 广州 510555)

摘 要: 近年来我国在地震带分布密集地区建设了高速铁路桥梁。邻近断层高速铁路桥梁有遭受强地震破坏的风险。对近断层地震动作用下确定合适的高铁连续梁桥抗震体系, 已成为当前强震区近断层高速铁路桥梁抗震设计亟须解决的问题。分析罕遇地震作用下桥梁的非线性时程, 讨论了双曲面球型减隔震支座的单独使用, 及其与黏滞阻尼器联合应用方案, 对近活动断层高速铁路连续梁桥进行抗震设计。发现单独使用双曲面球型减隔震支座的桥梁内力会降低, 但墩梁相对位移超限; 双曲面球型减隔震支座与黏滞阻尼器联合应用, 梁墩相对位移值大大减小。同时, 设置黏滞阻尼器后, 墩身内力总体上变化不大, 满足规范要求。

关键词: 近断层地震; 高速铁路连续梁桥; 地震响应; 减隔震控制

中图分类号: U442.55; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0188-04

Research on Seismic Isolation and Mitigation of Continuous Beam Bridges for High-Speed Railways near Faults

YANG Guojing¹, ZHANG Sujie¹, KOU Peipei¹, ZHENG Wei²

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China; 2. Guangzhou-Zhanjiang Railway Co., Ltd., Guangzhou 510555, China)

Abstract: In recent years, high-speed railway bridges have been built in the areas with dense seismic zones in China. High-speed railway bridges near faults have a high seismic risk. The determination of the appropriate seismic system of continuous beam bridges for high-speed railway under the action of near-fault ground motion has become an urgent problem to be solved in the seismic design of near-fault high-speed railway bridges in strong earthquake areas. The nonlinear time-history analysis of the bridge under the rare earthquakes is conducted. The single use of hyperboloid spherical seismic isolation bearing and its combined application with viscous damper are discussed. The seismic design of continuous beam bridges for high-speed railway near active fault is carried out. It is found that the internal force of the bridge using the hyperboloid spherical seismic isolation bearing alone will be reduced, but the relative displacement of the beam piers exceeds the limit. The joint application of hyperboloid spherical seismic isolation bearing and viscous damper will make the relative displacement of beam piers greatly reduced. At the same time, after setting the viscous damper, the internal force of the pier body does not change much on the whole, which meets the requirements of the specification.

Keywords: near-fault earthquake; continuous beam bridge for high-speed railway; seismic response; seismic isolation control

0 引 言

近 10 年,我国高速铁路建设进入了高速发展时期。高铁网络覆盖全国大部分区域,对于地震带分布密集地区,高铁桥梁建设难以实现断层避让原则。桥梁在高铁线路中占据极大比例,西部地域的高铁建设不可避免会面临线路邻近或穿越活动断层的问题,

未被勘察发现的隐伏活动断层也可能带来相应影响。铁路桥梁等国家重大工程不可避免地穿过地震易发区,工程抗震问题突出^[1-2]。以 2022 年 1 月 8 日发生的 6.9 级青海门源地震为例,跨越发震断层“冷龙岭”的祁连山隧道和附近铁路桥梁受损严重,以致兰新高铁停运,硫磺沟大桥部分主梁发生横向偏移,支座出现脱空及固定螺栓剪断,挡块被撞坏,轨道板侧倾,轨道和扣件严重损坏等震害。桥墩墩身出现裂缝或者钢筋屈曲等震害^[3-4]。可见,临近断层高铁桥梁有遭受强地震破坏的风险。另外,本文案例桥梁的高墩涉及到空心桥墩,其地震响应振型

收稿日期: 2025-12-05

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题 (2023A0248008)

作者简介: 杨国静(1987—),男,硕士,高级工程师,从事铁路桥梁、城轨桥梁结构设计工作。

呈现出复杂特征,地震发生时,空心高墩会受到弯、剪、扭的耦合作用,这对结构的抗震能力会产生显著的不利影响^[5]。

高速铁路连续梁桥的抗震研究主要集中在减隔震技术、抗震方案优化及地震响应分析等方面。在减隔震技术方面,户东阳等^[6]研究了减震樨在高烈度地震区的应用,验证了其在降低结构地震响应方面的有效性;王传坤等^[7]和刘正楠等^[8]则基于摩擦摆支座展开研究,结果表明该支座在不同地震作用下均能显著提高桥梁的抗震性能。此外,邵长江等^[9]通过振动台试验进一步验证了摩擦摆支座隔震技术的有效性。在抗震方案优化方面,冯莉等^[10]从全寿命周期成本角度出发,对减隔震方案进行了优化研究,提出了兼顾经济性和安全性的设计思路;刘正楠等^[11]针对大跨长联连续梁桥的减隔震方案进行了优化,为实际工程提供了重要参考。在地震响应分析方面,王晓黎^[12]对某高速铁路连续梁桥桥墩的地震反应进行了分析,揭示了抗震薄弱环节;黄瑞峰^[13]和杨华平等^[14]分别针对城际铁路大跨度连续梁桥和大跨铁路钢桁连续梁桥展开研究,进一步丰富了减隔震技术的应用场景。这些研究为高速铁路连续梁桥的抗震设计提供了全面的理论支持,推动了桥梁抗震技术的发展。

本文针对减隔震连续梁桥展开,以在建的跨径为 72 m+128 m+72 m 的淮宿高铁大桥为背景,比较了采用双曲面球形减隔震支座和黏滞阻尼器后的地震反应性能,并提出合适的推荐方案。本文在对淮宿高铁抗震性能研究基础上,给出近断层高铁桥梁合理抗震体系建议,为全线桥梁抗震设计提供技术支撑的同时,也为同类桥梁工程提供借鉴。

1 工程概况

淮宿高铁 128 m 连续梁桥全长为 273.7 m,计算跨度为 72 m+128 m+72 m,主墩中心线处的主梁高取值为 9.6 m,跨中截面、中跨直线段及边跨直线段主梁高均为 5.6 m。边支座横桥向中心间距为 5.46 m,中支座横桥向中心间距为 5.90 m。二期恒载取最不利值即最大值 180 kN/m。主桥相邻跨是 32 m 跨径简支箱梁。全桥布置图如图 1 所示。

连续梁主墩墩高为 8 m,双线圆端形实体桥墩,桥墩构造如图 2 和图 3 所示。采用大型有限元程序 MIDAS Civil 建立连续梁桥抗震计算模型,如图 4 所示。

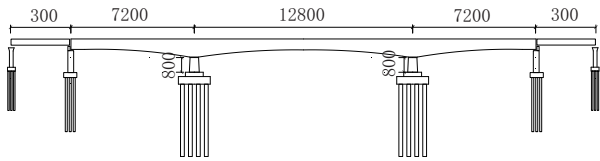


图 1 连续梁全桥布置图(单位: m)

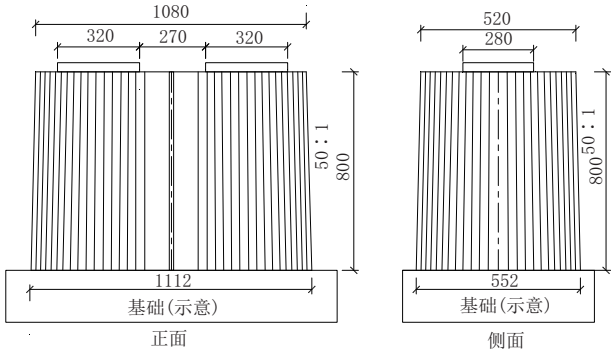


图 2 连续梁桥主墩构造图(单位: cm)

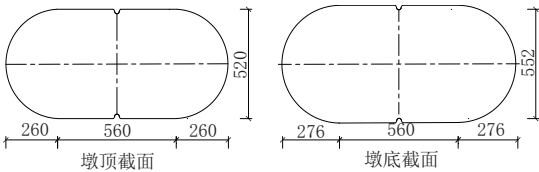


图 3 主墩横断面图(单位: cm)

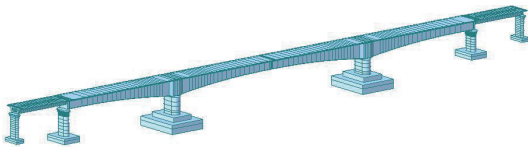


图 4 有限元模型示意图

主梁为 C55 混凝土,主墩是 C40 混凝土,边墩是 C35 混凝土;普通钢筋采用 HRB400 钢筋。受拉或受压钢筋采用理想弹塑性的应力—应变关系,并考虑可能进入强化阶段。约束混凝土采用 Mander 等人提出的应力—应变关系(见图 5)。

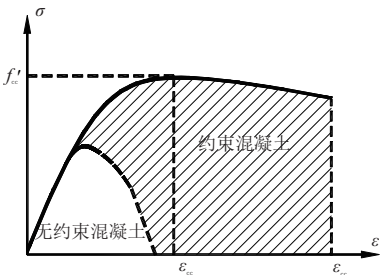


图 5 混凝土应力—应变关系

采用弹塑性纤维梁单元对连续梁进行非线性地震时程反应分析,单元沿轴向离散成许多段,每一段的特性由横断面代表,而横断面又进一步被离散成许多纤维。主墩底部截面纤维分割的情况如图 6 所示。

支座平面布置如图 7 所示。一个主墩为(双向)固定墩,对应的 3#支座为固定支座,4#支座特性为横桥向可活动,纵桥向固定。

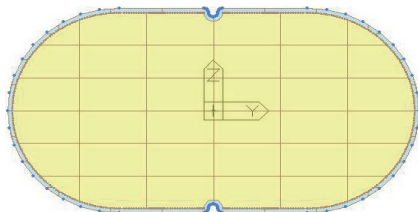


图6 墩底部截面纤维分割

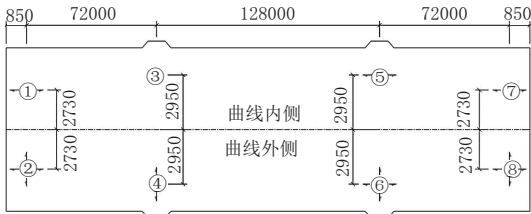


图7 支座平面布置图(单位:mm)

基础底部采用土弹簧模拟地基-桥梁相互作用,土弹簧取值如表1所示。减隔震装置采用程序内一般连接单元进行模拟。

表1 基础底部土弹簧取值

墩号	纵向水平 刚度/(10 ⁶ kN·m ⁻¹)	横向水平 刚度/(10 ⁶ kN·m ⁻¹)	竖向垂直 刚度/(10 ⁷ kN·m ⁻¹)	横向弯曲 刚度/(10 ⁸ kN·m·rad ⁻¹)	纵向弯曲 刚度/(10 ⁷ kN·m·rad ⁻¹)	扭转刚度/ (10 ¹² kN·m·rad ⁻¹)
1	1.55	1.40	1.52	1.87	9.86	1.00
2	6.27	6.64	7.13	36.3	229	1.00
3	6.27	6.64	7.13	36.3	229	1.00
4	1.55	1.40	1.52	1.87	9.86	1.00

3 减隔震设计及分析

3.1 双曲面球型减隔震支座

考虑到本桥所处桥位地震烈度高,且属于近断层地震动,在进行纵向地震和横向地震分析时,均相应输入竖向地震动。竖向地震动反应谱曲线和时程曲线与相应水平向地震动完全相同。采用非线性地震时程分析,对罕遇地震进行检

2 减隔震支座模拟

本桥罕遇地震加速度峰值高,8度($A_g=0.25g$, $T_g=0.45\text{ s}$)地区罕遇地震加速度峰值大($0.59g$),且罕遇地震加速度反应谱特征周期为 0.6 s ,制动墩地震响应显著,如纵桥向弯矩达到 $32\,546\text{ kN}\cdot\text{m}$,接近屈服弯矩值,常规抗震配筋设计难以满足需求。鉴于矮墩脆性破坏风险及高烈度地震作用特性,直接选择双曲面球型减隔震支座或结合黏滞阻尼器的减隔震体系开展抗震设计。本桥主墩采用的双曲面球型钢支座曲面半径为 6.6 m ,地震作用下摩擦系数为 0.08 ,支座吨位为 $70\,000\text{ kN}$,支座屈服位移为 2.5 mm ;边墩双曲面球型钢支座曲面半径 2.5 m ,地震作用下摩擦系数同样为 0.08 ,支座吨位为 $10\,000\text{ kN}$,支座屈服位移为 2.5 mm 。

算,计算结果进行汇总见表2和表3。可以看出,减隔震装置起作用后,桥梁内力响应大大减小。双曲面减隔支座的作用,其罕遇地震内力响应总体上与多遇地震相当,墩身混凝土和钢筋应力仍远小于规范限值。罕遇地震下桥墩纵向和横向梁-墩相对位移分别为 25.4 cm 和 33.5 cm ,超过梁缝限值,影响结构安全,应采取措施控制梁-墩相对位移。

表2 罕遇地震桥墩内力响应

罕遇地震加速度峰值(g)	桥墩尺寸		墩底内力响应			
	墩高/m	墩底截面尺寸 (横×纵)/(m×m)	纵向+竖向地震		横向+竖向地震	
			轴力/kN	纵向弯矩/(kN·m)	轴力/kN	横向弯矩/(kN·m)
0.59	8	11.12×5.52	158 640	166 745	157 382	331 252

表3 罕遇地震桥墩位移响应 单位:cm

罕遇地震加 速度峰值(g)	纵向位移响应			横向位移响应		
	主梁 位移	桥墩 位移	梁墩相 对位移	主梁 位移	桥墩 位移	梁墩相 对位移
	0.59	35.4	8.6	25.4	33.4	2.4

3.2 联合黏滞阻尼器

仅采用双曲面支座,桥梁纵向和横向梁-墩相对位移较大^[15]。探讨通过设置黏滞阻尼器控制墩梁相对位移。两主墩各设置2个300 t纵桥向黏滞阻尼

器,2个300 t横桥向黏滞阻尼器;两边墩各设置2个150 t纵桥向黏滞阻尼器,2个横桥向阻尼器。阻尼指数 α 均取 0.3 。表4和表5所示罕遇地震下墩身计算结果以及位移响应值。

可以看出,联合设置黏滞阻尼器后,梁墩相对位移值相比仅设置双曲面支座时大大减小,纵向和横向梁-墩相对位移分别为 13.7 cm 和 15.4 cm 。较单独设置双曲面球型减隔震支座,联合设置黏滞阻尼器墩梁相对位移分别降低 46% , 54% ,取得了很好的控

表 4 罕遇地震桥墩内力响应

罕遇 地震(<i>g</i>)	桥墩尺寸		墩底内力响应			
	墩高/ <i>m</i>	墩底截面尺寸 (横向×纵向)/(<i>m</i> × <i>m</i>)	纵向+竖向地震		横向+竖向地震	
			轴力/ <i>kN</i>	纵向弯矩/(<i>kN</i> · <i>m</i>)	轴力/ <i>kN</i>	横向弯矩/(<i>kN</i> · <i>m</i>)
0.59	8	11.12×5.52	157 265	172 362	155 421	360 920

表 5 罕遇地震桥墩位移响应 单位 *cm*

罕遇地 震(<i>g</i>)	纵向位移响应			横向位移响应		
	主梁 位移	桥墩 位移	梁墩相 对位移	主梁位 移	桥墩位 移	梁墩相 对位移
0.59	19.0	6.1	13.7	18.4	2.2	15.4

制位移的效果。同时,设置黏滞阻尼器后,墩身内力总体上变化不大,墩身混凝土和钢筋应力满足规范要求^[16]。

4 结 论

(1)72 m+128 m+72 m连续梁位于8度地震区(设计地震动参数 $A_g=0.25\text{ g}$ 、 $T_g=0.45\text{ s}$),推荐选择双曲面球型减震支座与黏滞阻尼器联合应用方案。

(2)支座通过滑动摩擦降低地震影响,显著降低桥梁的响应;黏滞阻尼器精准控制支座位移,确保罕遇地震下支座复位能力。

(3)后续的研究工作将考虑高铁桥梁钢挡块的约束作用,量化多遇和罕遇地震下对桥墩内力和墩梁相对位移的影响。

参考文献:

[1] 石岩,王东升,孙治国.近断层地震动下的高速铁路桥梁减震设计[J].中国铁道科学,2014,35(6):34-40.
[2] 刘也,任叶飞,王大任,等.2022年青海门源地震引起的兰新高铁硫磺沟大桥地表同震位移研究[J].中国铁道科学,2022,43(5):42-50.
[3] 王军文,田茂东,郝玉军,等.硫磺沟大桥的地震破坏机理研究[J].土

木工程学报,2025,58(11):117-127.

[4] ZHOU G, ZHU Z, TANG Y, et al. Seismic scenario reproduction and damage mechanism analysis of Liuhuagou Bridge under near-fault earthquake[J].Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 21:6091-6120.
[5] 孙治国,王东升,李宏男,等.钢筋混凝土空心桥墩应用及抗震性能研究综述[J].交通运输工程学报,2013,13(3):22-32.
[6] 户东阳,李聪林,陈克坚,等.减震樨在高烈度地震区高速铁路连续梁桥中的应用研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(9):2255-2263.
[7] 王传坤,杨孟刚.基于摩擦摆支座的高速铁路连续梁桥减隔震研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):564-572.
[8] 刘正楠,陈兴冲,张永亮,等.近远场地震作用下基于摩擦摆支座的高速铁路连续梁桥减隔震研究[J].中国铁道科学,2019,40(1):47-54.
[9] 邵长江,肖正豪,漆启明,等.摩擦摆支座隔震铁路连续梁桥振动台试验研究[J].振动与冲击,2021,40(14):292-298;306.
[10] 冯莉,王力,樊燕燕,等.基于全寿命周期成本的高速铁路连续梁桥减隔震方案研究[J].工程科学与技术,2020,52(5):161-169.
[11] 刘正楠,陈兴冲,马华军,等.高速铁路大跨长联连续梁桥减隔震方案优化研究[J].世界地震工程,2017,33(4):129-135.
[12] 王晓黎.某高速铁路连续梁桥桥墩地震反应分析[J].世界桥梁,2012,40(4):38-41.
[13] 黄瑞峰.城际铁路大跨度连续梁桥减隔震分析[J].铁道建筑,2019,59(7):22-24.
[14] 杨华平,钱永久,樊启武,等.大跨铁路钢桁连续梁桥减隔震方案比较研究[J].地震工程学报,2017,39(6):1097-1104.
[15] 全伟,于鸿铭,刘旭政,等.罕遇地震矮塔斜拉桥双曲面球形减震支座与液体黏滞阻尼器联合应用研究[J].铁道标准设计,2021,65(12):78-84.
[16] GB 50111—2006 铁路工程抗震设计规范(2009年版)[S].

(上接第 131 页)

和缩短工期。

(4)依据温度计算结果配筋,同时结合一定的构造措施,可对超长结构的裂缝变形情况进行有效控制。

参考文献:

[1] 洪静.光谷广场综合体方案设计论证[J].隧道建设(中英文),2018,38(3):424.
[2] 熊朝辉,周兵,何从.武汉光谷广场地下交通综合体设计创新与思考[J].隧道建设(中英文),2019,39(9):1471.
[3] 农兴中,曾毅.中心城区城市综合管廊与地铁合建型式研究[J].城市轨道交通研究,2024(1):55.
[4] 周兵.超大型复杂地下综合体工程结构设计研究[J].城市轨道交通研究,2020(5):35.
[5] 高扬.某大型城市地下空间结构抗震设计[J].结构工程师,2019,

35(5):17.

[6] 陈炜.顶板大开洞深层地下结构抗震性能分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(4):100.
[7] 曹辉.地铁、地下环路与地下空间合建结构抗震分析[C]//第十届中国建筑技术交流会.北京:《建筑结构》编辑部,2025.
[8] 李媛.超长地下混凝土框架结构温度应力分析[J].城市道桥与防洪,2018(6):238.
[9] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范(2016年版)[S].
[10] GB 50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S].
[11] 干泉,杨博进,刘伟,等.地下室泄水减压抗浮技术的探讨与应用[J].建筑结构,2016,46(2):86.
[12] 张建新.泄水减压方案在车库抗浮设计中的应用:以武汉新城·璞樾门第项目为例[J].工程技术研究,2020(15):19.
[13] DB 42/242—2014 建筑地基基础技术规范[S].