

文章编号: 1674—8247(2023)02—0038—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.008

非对称铁路连续梁桥抗震设计研究

黄树强 聂细锋 张大军 龚亚军

(中铁二院贵阳勘察设计研究院有限责任公司, 贵阳 550002)

摘 要: 为研究非对称铁路连续梁桥的抗震性能,以某(44+72+72+60+31)m 连续梁桥为研究对象,采用 MIDAS/Civil 软件建立三维有限元模型,输入罕遇地震作用下 3 条地震波,并采用非线性动力时程分析法对 3 种桥梁抗震设计方案进行研究。研究表明:全桥设置摩擦摆减隔震支座能有效降低桥梁各阶自振频率,仅在制动墩设置摩擦摆减隔震支座对桥梁高阶自振振型影响较小,全桥或仅制动墩设置摩擦摆减隔震支座均能降低墩身内力、桩基内力、墩顶位移、支座反力整体水平及结构材料用量,其中制动墩各项内力及位移减小最显著,非制动墩内力及位移变化幅度与墩高、支座布置方式及上部结构质量分布相关,体现出非对称性。

关键词: 非对称铁路连续梁桥;抗震设计;时程分析;摩擦摆减隔震支座

中图分类号: U442.55⁺5

文献标识码: A

A Study on the Seismic Design of Asymmetric Continuous Girder Railway Bridge

HUANG Shuqiang NIE Xifeng ZHANG Dajun GONG Yajun

(Guiyang Branch of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: To investigate the seismic performance of asymmetric continuous girder railway bridges, a (44 + 72 + 72 + 60 + 31) m continuous girder bridge was studied using a three-dimensional finite element model established with MIDAS/Civil, and three different seismic design schemes were analyzed through non-linear dynamic time history analysis, which involved inputting three seismic waves under seldomly occurred earthquakes. The study results indicate that: The use of friction pendulum bearing for seismic mitigation and isolation in the whole bridge can effectively reduce the natural vibration frequency of the bridge at all levels. The use of friction pendulum bearing for seismic mitigation and isolation only in the brake piers has little effect on the high-order natural vibration mode of the bridge. Both implementing friction pendulum bearing for seismic mitigation and isolation throughout the entire bridge or just in the braking piers can reduce the internal force of the pier body, the internal force of the pile foundation, the displacement of the pier top, the overall level of the bearing reaction force and the consumption of structural materials. Among them, the reduction of internal forces and displacement is most significant in the brake piers, and the variation range of the internal forces and displacement of the non-brake piers is related to the height of the piers, the layout of the bearings, and the mass distribution of the superstructure, reflecting asymmetry.

Key words: asymmetric continuous girder railway bridge; seismic design; time history analysis; friction pendulum bearing for seismic mitigation and isolation

收稿日期: 2022-09-04

作者简介: 黄树强(1972-),男,高级工程师。

引文格式: 黄树强,聂细锋,张大军,等. 非对称铁路连续梁桥抗震设计研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 38-42.

HUANG Shuqiang, NIE Xifeng, ZHANG Dajun, et al. A Study on the Seismic Design of Asymmetric Continuous Girder Railway Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 38-42.

地震作用是地震区桥梁设计考虑的关键因素之一,抗震设计是否合理直接影响桥梁结构在地震下的安全性。桥梁抗震设计方法通常采用延性抗震设计及减隔震设计^[1],延性抗震设计利用选定部分的塑性变形来抵抗地震作用,减隔震设计通常利用特制减震构件或装置增大结构阻尼,从而减小结构地震反应。摩擦摆减隔震支座在大跨度桥梁中已有较多运用,研究表明此装置能够较好的减小结构地震响应^[2-4]。

国内针对长联大跨连续梁桥抗震性能进行了较多的研究^[5-7],此类桥梁的显著特点为梁体质量大及单个制动墩主要承担全桥纵向水平地震力,制动墩纵向地震力和位移反应较大,非制动墩较小。非对称连续梁桥孔跨布置及梁体重量分布不对称,桥墩地震反应与桥跨布置形式、桥墩刚度及梁墩线刚度比有关^[8],针对跨度、墩高及梁截面变化非对称状况,既有文献对此类铁路桥梁抗震设计研究相对较少。

本文以某边跨及主跨非对称铁路连续梁桥抗震设计方案为依托,基于有限元软件 MIDAS/Civil 和非线性时程分析法进行研究,通过对比各方案桥梁结构地震响应,明确抗震力学性能变化规律。研究成果可为类似铁路连续梁桥抗震设计提供参考。

1 工程概况

以山区某拟建双线铁路混凝土连续梁桥为背景,桥梁总布置如图 1 所示,0 号、5 号为桥台,2 号墩为制动墩。列车设计速度为 200 km/h,桥梁平面位于直线上。

上部结构类型为预应力混凝土箱梁,桥面宽度为 11.6 m,72 m 主跨支点梁高 6.4 m,跨中梁高 3.5 m,60 m 主跨接 31 m 边跨支点梁高 4.5 m,跨中梁高 3.5 m,梁高按二次抛物线变化。下部结构采用圆端形实体墩,1 号、2 号、3 号墩双向均为变截面,4 号墩为等截面,桩基为嵌岩桩,桥台桩基直径均为 1.25 m,桥墩桩基桩径均为 1.5 m,墩台桩长均为 10 m。上覆土层主要为圆砾土及角砾土,持力层为砂岩。

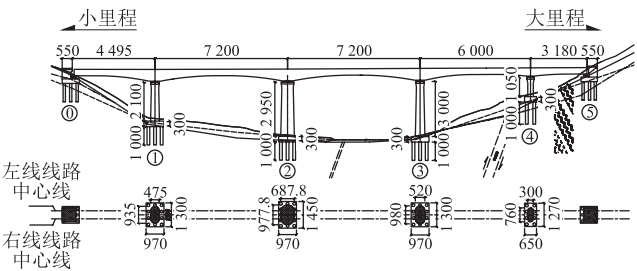


图 1 桥梁总体布置图 (cm)

桥墩及桩基参数如表 1 所示,桥墩线刚度已考虑

承台、桩基影响。桥墩截面尺寸选定满足相关规范^[9]规定的刚度要求及轨道变形要求。

表 1 桥墩及桩基参数表

墩号	高度/m	桩基根数	桥墩纵向线刚度/ (kN/cm)	桥墩横向线刚度/ (kN/cm)
1	21	12	3 215	8 065
2	29.5	15	2 688	4 878
3	30	12	1 474	4 065
4	10.5	8	4 545	14 925

抗震设计方案分类如表 2 所示,方案一中固定、单向及双向活动支座均为球形钢支座,自由度约束方向刚度假定为 106 kN/m,0 号~5 号墩台支座竖向承载力分别为 6 000 kN、30 000 kN、30 000 kN、30 000 kN、20 000 kN 及 4 500 kN,每个墩、台顶均设置 2 个支座,支座横向间距均为 5.3 m。方案二中各墩、台均采用摩擦摆支座。方案三相应支座参数同方案一、方案二。

表 2 桥梁抗震设计方案表

抗震设计方案	连接方式			
	1 号墩主梁	2 号墩主梁	3 号及 4 号墩主梁	0 号及 5 号桥台主梁
一	纵向活动支座(1 个)+双向活动支座(1 个)	固定支座(1 个)+横向活动支座(1 个)	纵向活动支座(1 个)+双向活动支座(1 个)	纵向活动支座(1 个)+双向活动支座(1 个)
二	摩擦摆减隔震支座(2 个)	摩擦摆减隔震支座(2 个)	摩擦摆减隔震支座(2 个)	摩擦摆减隔震支座(2 个)
三	纵向活动支座(1 个)+双向活动支座(1 个)	摩擦摆减隔震支座(2 个)	纵向活动支座(1 个)+双向活动支座(1 个)	纵向活动支座(1 个)+双向活动支座(1 个)

双曲面摩擦摆支座正常使用时,通过设置剪力键限制支座位移。罕遇地震作用下,剪力键剪断后支座可沿滑动面往复摆动,由正常使用时 2 号制动墩主要承受水平地震力转化为各墩协同受力。支座滑面曲率半径及摩擦系数为双曲面摩擦摆支座耗能性能关键影响因素,方案二各墩支座参数如表 3 所示,初始刚度取 2.5 mm 对应刚度,有效刚度为设计位移 150 mm 时对应的刚度。

2 有限元模型

采用 MIDAS /Civil 有限元软件建立该桥有限元模型,全桥构件均采用三维梁单元,共计 453 个单元。有限元模型通过节点弹性支撑分析桩-土相互作用,弹簧刚度由 m 法计算^[10],圆砾土及角砾土 $m=30\,000\text{ kN/m}^4$ 。支座通过建立梁部与墩顶节点连接单元进行模拟,支座相应刚度通过连接单元参数输入,摩擦摆减隔震支座恢复力模型采用双线性模型。

本桥场地抗震设防烈度为Ⅷ度,桥址为Ⅱ类

表 3 桥梁抗震设计方案表						
墩台号	支座类型	恒载支反力/kN	摩擦系数	滑面曲率半径/m	初始刚度/(kN/m)	有效刚度/(kN/m)
0号台	纵向活动	2 952	0.06	2.3	70 848	2 464
	双向活动	2 952	0.06	2.3	70 848	2 464
1号墩	纵向活动	16 608	0.06	4.8	398 592	10 103
	双向活动	16 608	0.06	4.8	398 592	10 103
2号墩	横向活动	18 312	0.06	4.8	439 488	11 140
	固定支座	18 312	0.06	4.8	439 488	11 140
3号墩	纵向活动	17 230	0.06	4.8	413 520	10 482
	双向活动	17 230	0.06	4.8	413 520	10 482
4号墩	纵向活动	10 888	0.06	4.8	261 312	6 624
	双向活动	10 888	0.06	4.8	261 312	6 624
5号台	纵向活动	2 397	0.06	2.3	57 528	2 001
	双向活动	2 397	0.06	2.3	57 528	2 001

场地,地震动峰值加速度为 0.2g,场地特征周期为 0.45 s。采用人工波程序生成与规范规定反应谱匹配的 3 条罕遇地震作用(50 年超越概率为 2%)的水平地震动加速度时程曲线,峰值加速度为 0.38g。

桥梁抗震验算荷载采用地震作用与恒载及列车活载最不利组合。每种方案按纵向和横向分别施加地震动,纵桥向不计算活荷载引起的地震作用,横桥向计入 50%活载引起的地震作用。上述荷载计算及组合均按相关规范执行。

3 抗震计算结果分析

3.1 自振特性计算对比分析

各方案桥梁自振特性有限元分析结果如表 4 所示。

表 4 各方案自振特性表(Hz)						
阶数	方案一		方案二		方案三	
	自振频率	振型	自振频率	振型	自振频率	振型
1	0.690	纵向摆动	0.565	纵向摆动	0.279	纵向摆动
2	1.070	横向摆动	0.570	横向摆动	0.856	横向摆动
3	1.426	横向扭转	0.601	横向扭转	1.402	横向扭转
4	1.701	竖向波动	0.715	横向摆动	1.700	竖向波动
5	2.068	横向扭转	1.222	横向扭转	1.986	横向扭转

由表 4 可知,3 种方案一阶振型均为纵向摆动,方案二、方案三因设置减隔震支座自振频率减小,从而增大了结构自振周期。方案二 2~5 阶振型自振频率较方案一、方案三显著减小,且整体变化幅度最小,方案一及方案三 3~5 阶振型自振频率非常接近,表明全桥设置减隔震支座能有效降低各阶自振频率,仅在制动墩设置减隔震支座对高阶振型影响较小。主要原因为摩擦摆支座在地震作用下通过减隔震装置往复摆动,从而延长了结构的基本周期。

3.2 桥墩内力计算对比分析

最不利组合作用下,3 种方案各项内力结果如图 2、图 3 及表 5 所示,墩底纵向剪力、弯矩为纵向罕遇地震组合作用下最大内力,墩底横向剪力、弯矩为横向罕遇地震组合作用下最大内力。

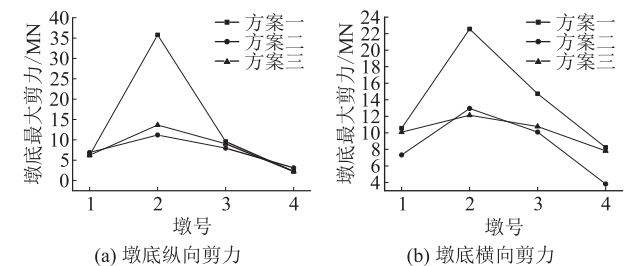


图 2 各方案墩底剪力分布图

由图 2 可知,3 种方案中制动墩剪力均最大,非制动墩墩底剪力均与桥墩高度及墩顶承受梁部重量正相关。方案一较方案二、方案三制动墩剪力显著增大,纵向剪力比值达约 3 倍。方案一中 1 号、4 号墩剪力较方案二小,方案二桥墩横向整体剪力水平最低。

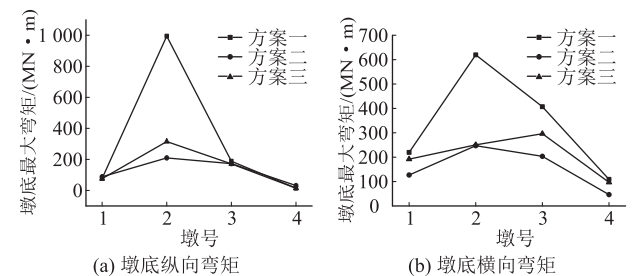


图 3 各方案墩底弯矩分布图

由图 3 可知,3 种方案中制动墩弯矩均最大,且非制动墩墩底弯矩均大于纵向弯矩,非制动墩墩底弯矩大小均与桥墩高度及墩顶承受梁部重量正相关。方案一较方案二、方案三制动墩弯矩显著增大,方案一较方案二纵向弯矩比值为 4.7,横向比值为 2.5。方案一中 1 号、4 号墩纵向弯矩较方案二小,方案二桥墩横向弯矩整体水平最低。

桥墩为钢筋混凝土受压构件或偏压构件,主筋型号为 HRB400,根据相关规范^[11-12],墩身截面主筋配筋率不应小于 0.5%,并不大于 4%。最不利组合下作用下,各方案截面配筋计算如表 5 所示。

表 5 墩底截面验算表

墩号	方案	控制轴力/kN	钢筋最大应力/MPa	最大裂缝宽度/mm	延性比	主筋设置	配筋率/%
1	方案一	111 982	99	0.04	-	268根 28 mm	0.51
	方案二	110 139	72	0	-	268根 28 mm	0.51
	方案三	106 991	89	0.02	-	268根 28 mm	0.51
2	方案一	156 246	640	0.85	4.38	640根 32 mm	0.90
	方案二	156 182	262	0.03	-	360根 32 mm	0.51
	方案三	158 999	332	0.51	-	500根 32 mm	0.70
3	方案一	133 589	149	0.16	-	288根 32 mm	0.51
	方案二	133 955	85	0.01	-	288根 32 mm	0.51
	方案三	131 831	109	0.05	-	288根 32 mm	0.51
4	方案一	60 941	100	0.05	-	216根 25 mm	0.51
	方案二	61 312	62	0	-	216根 25 mm	0.51
	方案三	62 070	91	0.03	-	216根 25 mm	0.51

由表 5 可知,非制动墩墩底截面满足最小配筋率条件下,截面裂缝及钢筋应力均满足规范要求。2 号制动墩不同方案配筋差异较大,方案一墩底截面进入塑性阶段,钢筋最大应力超过屈服强度;方案二墩底截面处于弹性状态;方案三墩底截面钢筋未屈服,裂缝宽度较大。方案一墩底截面所需配筋率最高,为方案三约 1.8 倍,经济性及安全性最差,方案二相比最好。

上述各项分析表明,制动墩设置摩擦摆减隔震支座能显著减小墩身内力,全桥设置摩擦摆减隔震支座,能够降低桥墩整体内力水平,提高桥梁在罕遇地震作用下的安全性,并降低桥墩材料用量。主要原因为罕遇地震作用下,摩擦摆支座的设置能够减小各墩与梁体的约束刚度差异,使各墩协同受力,较方案一单制动墩受力体系更为合理。

3.3 桩基内力计算对比分析

最不利组合作用时制动墩桩基外力及验算结果如表 6 所示,桩基钢筋型号为 HRB400。

表 6 制动墩桩基验算表

方案	方案一	方案二	方案三
控制轴力/kN	35 659	18 910	20 870
最大弯矩/(kN·m)	6 083	1 718	2 148
钢筋最大应力/MPa	507	276	324
配筋率/%	3.09	0.53	0.53
配筋形式	68根 32 mm	30根 20 mm	30根 20 mm

由表 6 可知,方案一桩基内力及钢筋应力最大,

桩基配筋率达到 3%时,桩基钢筋仍发生屈服,方案二、方案三桩基配筋在满足最小配筋率 0.5%的条件下,钢筋均不发生屈服。综合对比表明方案一材料用量大,安全性能低。主要原因为摩擦摆支座设置使得制动墩对主梁的约束效应较方案二固定支座减弱,制动墩顶分担的有效主梁质量降低,从而显著降低制动墩及桩基承受的地震力。

3.4 墩顶位移计算对比分析

最不利组合作用下,各方案桥墩墩顶位移如表 7 所示,表中纵向位移以桥梁大里程方向为正,横向位移以桥梁左侧为正。

表 7 各方案墩顶位移表(mm)

墩号	方案一		方案二		方案三	
	纵向	横向	顺向	横向	顺向	横向
1	-12	-15	-12	-7	12	13
2	125	41	-27	-16	-39	-17
3	39	38	32	-17	36	28
4	4	-6	7	-3	4	-5

由表 7 可知,方案一制动墩墩顶位移最大,与方案二纵向位移比值为 4.6,横向位移比值为 2.6。3 种方案非制动墩墩顶位移大小与墩高正相关,方案二中 2 号、3 号高墩墩顶位移相比方案一、方案三均小,表明摩擦摆减隔震支座设置有利于降低较高墩位移水平。主要原因为摩擦摆支座的设置能够减小各墩与梁体的约束刚度差异,使得各墩协同受力,协同变形。

3.5 支座最大竖向反力计算对比分析

罕遇地震作用下,方案一各方案墩顶支座最大竖向反力如图 4 所示,3 个方案制动墩支座最大水平剪力分别为 15 444 kN、1 777 kN 及 3 523 kN。

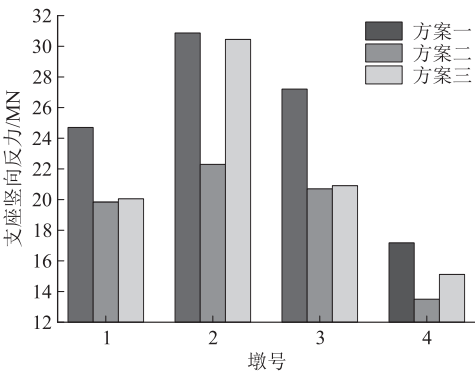


图 4 各方案支座竖向反力分布图

由上述可知,方案一制动墩支座竖向反力及水平剪力最大,方案二最小,水平剪力的减小最为显著。方案一支座承受反力整体水平最大,方案二支座承受反力整体水平最小。方案一支座水平剪力与支座竖

向承载力比值为0.51,表明罕遇地震作用下支座已发生破坏。主要原因为摩擦摆支座设置能够延长结构体系基本周期,从而避开地震能量集中范围,使得结构所承受的地震响应显著降低。

4 结论

本文通过对非对称铁路连续梁桥抗震设计进行研究得出主要结论如下:

(1)3种方案一阶振型均为纵向摆动,全桥设置摩擦摆减隔震支座方案能有效降低各阶自振频率,仅在制动墩设置减隔震支座方案对高阶自振振型影响较小。

(2)制动墩设置摩擦摆减隔震支座能显著减小墩身及桩基内力,全桥设置摩擦摆减隔震支座方案,能够降低桥墩整体内力水平。

(3)制动墩设置摩擦摆减隔震支座能显著减小墩顶纵向位移,全桥设置摩擦摆减隔震支座方案,有利于降低较高墩位移水平。

(4)非制动墩墩底内力与桥墩高度及墩顶承受梁部重量正相关,结构非对称性引起内力分布差异。

(5)制动墩设置摩擦摆减隔震支座能显著减小墩顶支座竖向及水平反力,水平剪力的差异最为显著。

(6)基于墩身、桩基材料用量及罕遇地震作用下结构安全性的综合考虑,本桥应选用全桥设置减隔震方案。

参考文献:

- [1] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2017.
YE Aijun, GUAN Zhongguo. Seismic Design of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [2] 陈列,胡京涛. 桥梁减隔震技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2014.
CHEN Lie, HU Jingtao. Bridge Seismic Isolation Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [3] 陈克坚,谢海清,何庭国,等. 复杂艰险山区高速铁路桥梁设计技术[J]. 高速铁路技术,2020,11(2):112-117.
CHEN Kejian, XIE Haiqing, HE Tingguo, et al. Design Technology for High-speed Railway Bridge in Complex and Dangerous Mountainous Area [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2):112-117.
- [4] 杨喜文,李建中,雷昕弋. 多孔大跨度连续梁桥减隔震技术应用研究[J]. 中国公路学报,2010,23(6):58-65.
YANG Xiwen, LI Jianzhong, LEI Xinyi. Research on Application of Seismic Isolation Techniques to Multiple and Large-span Continuous Girder Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6):58-65.
- [5] 邱新林,廖平,赵人达,等. 多跨连续梁桥的隔震方案研究[J]. 铁道建筑,2017,57(6):41-43,52.
QIU Xinlin, LIAO Ping, ZHAO Renda, et al. Study on Seismic Isolation Schemes of Multi-span Continuous Girder Bridge [J]. Railway Engineering, 2017, 57(6):41-43, 52.
- [6] 何庭国,袁明,陈列,等. 福厦铁路跨越乌龙江长联大跨连续梁桥设计[J]. 桥梁建设,2008,38(4):43-46.
HE Tingguo, YUAN Ming, CHEN Lie, et al. Design of a Long Span and Long Continuous Unit Continuous Girder Bridge on Section of Fuzhou-Xiamen Railway Spanning Wulong River [J]. Bridge Construction, 2008, 38(4):43-46.
- [7] 夏修身,崔靛波,陈兴冲,等. 长联大跨连续梁桥隔震技术应用研究[J]. 桥梁建设,2015,45(4):39-45.
XIA Xiushen, CUI Liangbo, CHEN Xingchong, et al. Study of Application of Seismic Isolation Techniques for Long Span and Long Unit Continuous Beam Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(4):39-45.
- [8] 刘保东,李鹏飞,陈海波. 考虑连续梁桥布置方案的横向地震反应规律研究[J]. 中国铁道科学,2009,30(6):33-37.
LIU Baodong, LI Pengfei, CHEN Haibo. Seismic Response Analysis for Continuous Beam Bridges in Transverse Direction Considering the Bridge Layout Scheme [J]. China Railway Science, 2009, 30(6):33-37.
- [9] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].
TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].
- [10] TB 10093-2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].
TB 10093-2017 Code for Design of Subsoil and Foundation for Railway Bridge and Culvert [S].
- [11] GB 50111-2006 铁路工程抗震设计规范[S].
GB 50111-2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering [S].
- [12] TB 10092-2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].
TB 10092-2017 Code for Design of Concrete Structures of Railway Bridge and Culvert [S].