

高烈度震区高速铁路简支梁抗震体系研究

全伟¹,王东升²

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要 目的 研究高烈度震区简支梁采用抗震体系对桥梁安全性和经济性的影响, 为高烈度震区简支梁抗震设计提供依据. 方法 以雅万高铁 32 m 简支梁为例, 采用非线性时程分析方法, 对比采用延性抗震体系简支梁桥以及采用减隔震体系简支梁桥在抗震性能上的差异. 并对两种方案工程造价上的差异进行对比分析. 结果 采用延性抗震体系的简支梁桥, 虽然支座造价略便宜, 但桩基长度和配筋均大于减隔震体系的简支梁桥, 减隔震体系在造价上更优; 同时, 采用减隔震体系桥梁在罕遇地震下仅支座锚栓发生剪断, 桥梁整体保持弹性, 相比抗震性能更优. 结论 综合造价及抗震性能, 推荐高烈度震区高速铁路简支梁桥优先采用减隔震体系.

关键词 高烈度震区; 高速铁路; 简支梁; 抗震体系

中图分类号 TU311; U441⁺.4

文献标志码 A

Earthquake Resistance System Research of High-speed Railway Simply Supported Bridge under High-intensity Seismic Region

QUAN Wei¹, WANG Dongsheng²

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401)

Abstract: For high-speed railway, bridge proportion is high, and simply-supported bridge is often used for small and medium bridges. The earthquake resistance system is studied for the safety and economy of beam. The study can give reference to the seismic design of simply-supported beam under high-intensity seismic region. Take 32m simply-supported beam in Djakarta-Bandung high speed railway as an example, two feasible earthquake resistance systems including ductile seismic system (Common spherical bearing is adopted) and seismic mitigation and isolation system (Hyperboloid spherical seismic mitigation and isolation bearing is adopted) are compared. The seismic performance and engineering costs are contrasted. The results show as follows: for the simply-supported beam using ductile seismic system, the pile length and the reinforcement rate are all larger than the system using seismic mitigation and isolation bearing. Although the bearing is a little chea-

收稿日期: 2016-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478074); 辽宁省自然科学基金项目(20170540762); 沈阳建筑大学科学研究项目(2017040)

作者简介: 全伟(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁工程研究.

per, the overall costs are more expensive than the seismic mitigation and isolation system. Meanwhile, for the seismic mitigation and isolation system, although the bearing bolts are shear broken, the bridge is on the whole elastic. The seismic performance is better than the ductile system. Through the comparison between costs and seismic performance, the seismic mitigation and isolation system should be recommended in high-intensity region.

Key words: high-intensity seismic region; high-speed railway; simply-supported girder; earthquake resistance system

随着我国大规模铁路建设的持续开展以及国家“一带一路”发展战略的加速推进,高速铁路建设方兴未艾。我国西部地区及部分东南亚国家是未来高速铁路建设的主战场,而这些地区很大一部分均为高烈度震区。中、小跨度桥梁占高速铁路桥梁的绝大多数,我国已建高速铁路,不论是低烈度震区和高烈度震区一般都是以简支梁为主。我国高铁对简支梁的设计、施工积累了丰富的经验。同样处于高烈度震区的日本和中国台湾高铁也大量使用了简支梁^[1-2]。从工期以及施工成本角度讲,简支体系主梁适宜工场预制,结构施工质量有保证,施工模板、机具等可重复使用,适于大规模批量生产。上、下部结构可同时进行施工,尤其适用于施工工期紧张的情况。管仲国^[3]对城市高架桥合理抗震体系与经济性进行了对比,指出了减隔震体系的优点。Mitoulis S A^[4]开展了不同桥梁抗震体系下结构的经济性分析。Krishnamoorthy A^[5]研究了摩擦摆式隔震支座桥梁的减震性能。陈令坤等^[6]对高速铁路简支梁桥地震反应特性进行了研究。孟兮等^[7]开展了高速铁路简支梁桥中减震樨的设计及其减震性能研究。

目前,还未见针对高烈度震区高速铁路简支梁桥开展抗震体系对比的研究。综合考虑施工周期、施工成本、抗震性能以及震后修复的难易程度,简支梁也是高烈度震区首选的桥型之一。对于高烈度震区,根据文献[8]要求,支座应满足设计地震作用下的水平力,该水平力较大时,采用常规支座已不能满足设计要求,需重新设计,以提高支座的水平承载力。因此,对于高烈度震区,仍然采用普通

常规支座还是采用其他减隔震体系应进行详细的对比分析研究。基于此,笔者首先对国内外抗震规范中合理抗震体系进行归纳总结,然后对简支梁延性抗震体系和减隔震抗震体系进行详细的抗震性能分析和经济造价对比,最后根据对比分析结果,推荐适用于高烈度震区的合理抗震体系。

1 高烈度震区合理抗震体系

合理的抗震结构体系有两个基本特征:一是传力不间断;二是桥梁保持整体性。因此,结构既要选择合理有效的抗震单元,如墩柱塑性铰、减隔震装置等;又要采取有效的连接措施,如足够的支承宽度、纵向限位器、横向挡块等^[9-14]。

文献[15]规定对于中等或者高烈度震区,同时考虑经济和安全的原因,使得桥梁具有塑形变形能力是更合理的形式,即在罕遇地震作用下提供一种耗散大部分地震输入能量的方法。这种塑形变形能力包括以下两种方式:①弯曲塑形铰的合理设置;②采用减隔震装置来耗散地震能量。

文献[16]明确规定了对于C、D类桥梁,即处于高烈度震区桥梁,桥梁的合理抗震体系包括以下3种:①延性下部结构以及基本弹性上部结构。主要指的是传统混凝土结构桥梁、桥墩、柱等出现塑形铰,耗散地震能量;②延性上部结构和弹性下部结构。主要指的是上部结构为钢结构的桥梁;③上、下部结构之间设置熔断装置。所谓熔断装置指的就是减隔震和耗能装置。

文献[8]规定,对于位于7、8、9度的桥

梁等应按罕遇地震对钢筋混凝土桥墩进行延性验算或最大位移分析。在高烈度震区有条件时可采用减隔震设计,采用减隔震设计的桥梁,应满足正常使用功能的要求。位于地震区的桥梁,其上部结构应采用防止落梁,设置档块等抗震措施;有条件时可采用铅芯橡胶支座或者其他减震、耗能装置,以减小梁部的地震作用。

文献[17]规定,需要验算 E2(罕遇地震)作用下抗震能力的钢筋混凝土墩柱式梁桥,可将墩柱作为延性构件设计,将基础、盖梁、梁体和结点作为能力保护构件设计。桥梁宜采用构造简单、性能可靠的减隔震装置。

综合各国抗震设计规范的综合分析,对于地震区的简支梁桥,延性结构体系和减隔震结构体系是两种可以采用的结构体系,具体采用何种抗震体系应综合经济、技术等各方面条件比选最终确定。

2 工程简介

印尼雅加达至万隆高速铁路线路全长 142.3 km,是雅加达至泗水高速铁路(全长约 800 km)的一部分,设计运行速度 350 km/h。建成通车后,雅加达到万隆间的旅行时间,将由现在的 3 h 缩至 40 min。根据印尼桥梁抗震设计规范给定的地震动参数区划图,雅万高铁沿线地震动加速度峰值相当于我国抗震规范 8 度 0.3 g 及 9 度 0.4 g 水平,地震烈度高,抗震设计难度大。主梁采用单向单室箱梁,桥墩采用双线圆端形桥墩,全线桥墩平均墩高约为 15 m,取 15 m 墩高为例进行说明,桥墩构造及墩底配筋如图 1 和图 2 所示。

桥墩抗震设计按中国铁路工程抗震设计规范进行,采用非线性时程分析法^[18-19]。地震动参数选取其中一个区段地震动参数进行设计,该地震动参数来自万隆技术学院提供的地震安评报告。该区段为 II 类场地土,多遇地震加速度峰值为 0.14 g,特征周期为

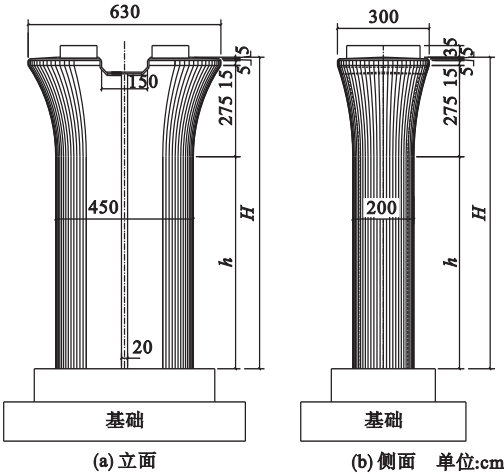


图 1 桥墩构造

Fig. 1 Pier structural layout

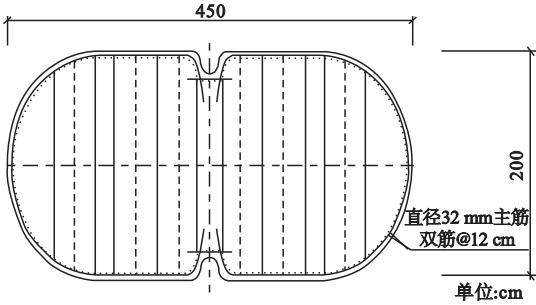
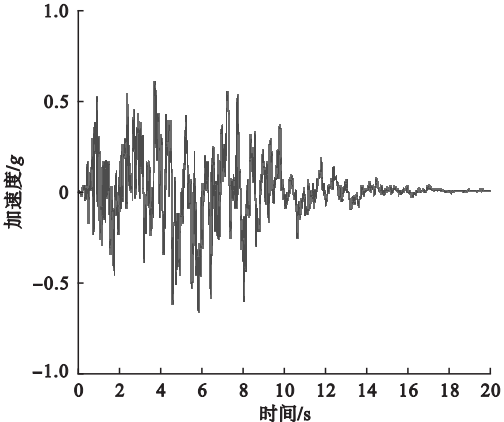


图 2 桥墩墩底配筋

Fig. 2 Pier bottom bar arrangement

0.5 s;设计地震加速度峰值为 0.34 g,特征周期为 0.74 s;罕遇地震加速度峰值为 0.57 g,特征周期为 0.89 s;地震动采用我国铁路规范反应谱曲线。图 3 给出了生成的罕遇地震加速度时程曲线以及和规范反应谱曲线的拟合情况。



(a) 人造地震动时程曲线

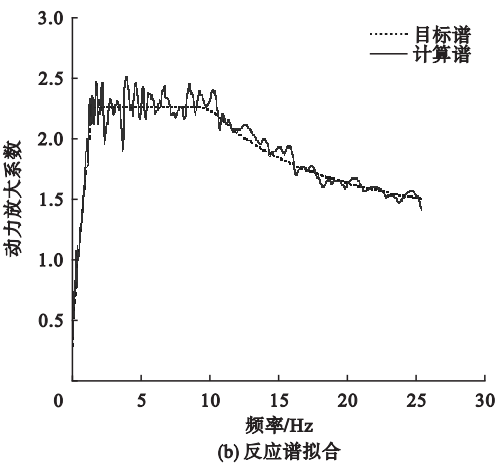


图3 罕遇人造地震动及反应谱拟合情况

Fig. 3 Artificially simulated rarely occurred earthquake

3 延性抗震体系

采用大型有限元软件 Midas Civil 2015 程序建立简支梁-桥墩全桥抗震计算模型, 为了排除边界效应的影响, 选取4跨32 m 简支梁进行计算分析. 取中间桥墩地震作用下

内力响应进行分析. 桥墩墩身混凝土采用 C40, 钢筋采用 HRB400 钢筋. 简支梁墩顶采用双固定、双纵向支座, 基础底部加土弹簧模拟地基与结构的相互作用. 抗震计算模型如图4所示.

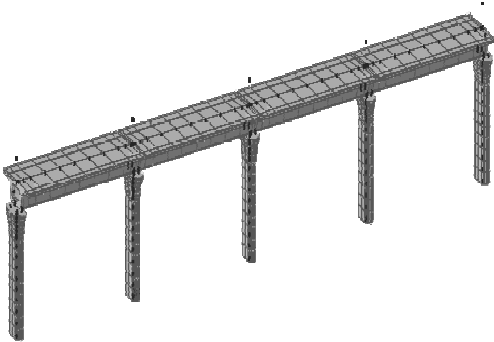


图4 简支梁-桥墩整体抗震计算模型

Fig. 4 Simply-supported girder-pier seismic calculation model

普通球形钢支座构造图如图5所示(图中为固定支座).

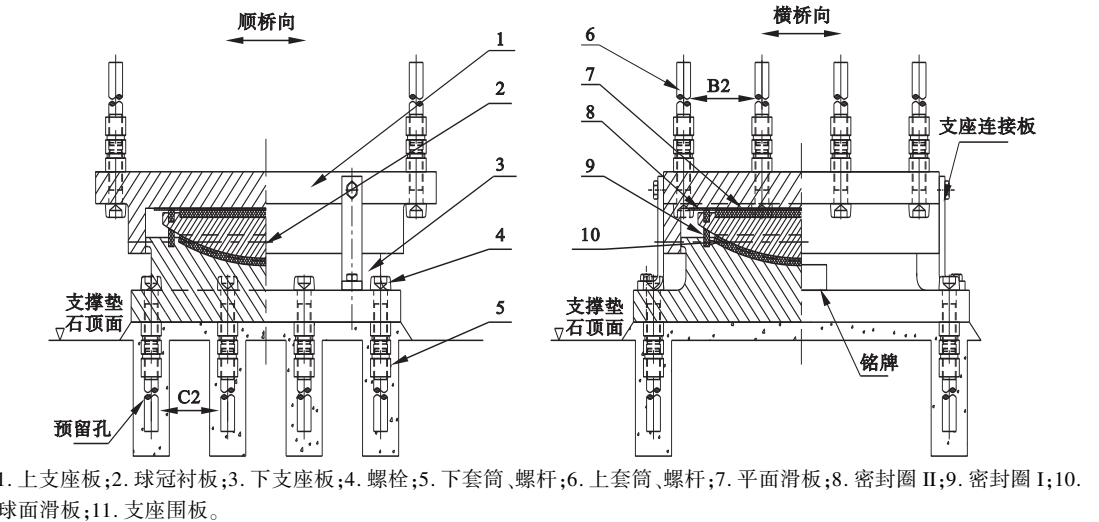


图5 铁路桥梁普通球形钢支座结构图

1. 上支座板; 2. 球冠衬板; 3. 下支座板; 4. 螺栓; 5. 下套筒、螺杆; 6. 上套筒、螺杆; 7. 平面滑板; 8. 密封圈 II; 9. 密封圈 I; 10. 球面滑板; 11. 支座围板。

Fig. 5 Structural layout drawing of railway bridge common spherical bearing

桥墩地震检算根据我国铁路工程抗震设计规范要求进行, 桥梁需满足小震不坏, 中震可修, 大震不倒的性能水准. 计算时按多遇地震检算墩身配筋, 设计地震验算上、下部结构连接构造的强度, 按罕遇地震对桥墩进行延性验算.

(1) 多遇地震 (检算墩身配筋)

多遇地震控制桥墩配筋, 多遇地震加速度

峰值为 0.14 g, 相当于我国铁路工程抗震设计规范 9 度水平. 表 1 给出了纵向和横向地震下, 墩底截面的内力. 多遇地震作用下混凝土压应力许用值为 20.25 MPa, 钢筋拉应力许用值为 315 MPa, 混凝土压应力及钢筋拉应力均满足规范要求. 桥墩墩底配置直径 32 mm 的 HRB400 钢筋, 双筋间距 12 cm, 配筋率 1.63%.

表 1 多遇地震桥墩墩底内力及配筋计算

Table 1 Pier bottom internal force and reinforcement calculation under frequently occurred earthquake								
纵向多遇地震					横向多遇地震			
加速度 峰值/g	轴力/kN	纵向弯矩/ (kN·m)	混凝土压 应力/MPa	钢筋拉 应力/MPa	轴力/kN	横向弯矩/ (kN·m)	混凝土压 应力/MPa	钢筋拉 应力/MPa
0.14	16 270	64 709	13.5	300	16 270	94 126	15.9	308.9

(2)设计地震(检算支座)

设计地震下检算支座水平力,计算支座水平力与竖向承载力的比值,考察支座的受力状态.设计地震支座最大水平力检算结果

见表 2. 由表 2 可以看出,设计地震作用下,支座纵向支座水平力为 5 605 kN,为竖向支座承载力的 1.25 倍,设计困难,必然造成支座造价的增加.

表 2 设计地震支座最大水平力检算

Table 2 Maximum horizontal force calculation of bearings under design earthquake					
加速度 峰值/g	纵向支座 水平力/kN	横向支座 水平/kN	支座吨 位/kN	水平和竖向 承载力比值	是否 可行
0.33	5 605	2 951	4 500	1.25	支座需特殊设计,代价高

(3)罕遇地震(检算是否满足大震不倒的性能水准)

罕遇地震考察桥墩底部是否发生延性破坏,如发生延性破坏,桥墩非线性位移延性系数是否满足要求.根据我国铁路工程抗震设计规范 7.3.3 条规定,允许位移延性系数限值为 4.8 (见表 3).由表 3 可以看出,桥墩屈服时刻位移为 9.5 cm,极限位移为 22.59 cm,位移延性系数计算值为 2.38,小于延性系数限值 4.8,满足大震不倒的性能水准.

表 3 罕遇地震延性系数检算

Table 3 Ductility coefficient calculation under rarely occurred earthquake						
罕遇地震下加 速度峰值/g	反应谱特 征周期/s	屈服时刻 位移/cm	极限位 移/cm	位移延 性系数	限值	是否 满足
0.57	0.89	9.5	22.59	2.38	4.8	满足

根据能力保护设计原理,桥墩发生塑性破坏之前,需保证桩基仍处于弹性状态.因此,根据多遇地震计算得到的桩长和

配筋需相应增加.表 4 给出了多遇地震和罕遇地震检算下,桥梁相应桩长和配筋数量.

表 4 罕遇地震引起钢筋和混凝土增量

Table 4 Incrementation of rebar and concrete under rarely occurred earthquake					
项目	配筋面积/cm ²	桩长/m	桩基数量/根	钢筋质量/t	混凝土体积/m ³
多遇地震	102.1	48	11	42.32	414.69
罕遇地震	204	56	11	98.65	483.81
差值	101.9	8	0	56.33	69.12

由表 4 可知,多遇地震加速度峰值为 0.14 g 时,桩长为 48 m,桩基配筋面积为 102.1 cm².罕遇地震检算,根据能力保护设计原理,桩长需增加到 56 m,配筋面积需增

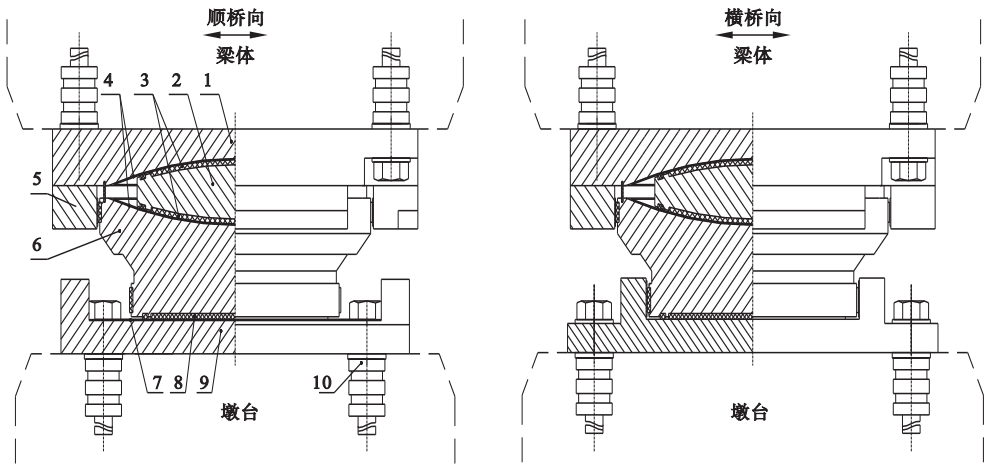
加到 204 cm².相应增加混凝土方量 69.12 m³,钢筋量 56.33 t.其中,钢筋每吨综合单价 4 342.9 元;混凝土综合单价 1 368.7 元.因此,总造价约增加 33.9 万元.

4 减隔震抗震体系

双曲面或者摩擦摆式支座,具有承载能力强、稳定性良好、复位功能和抗平扭能力强等特点,且该支座震后具有自复位功能,震后可反复利用,是一种减震效果较好,设计寿命较长的支座.其缺点是可能会抬升梁体^[12-13].

对于普通双曲面球型减隔震支座,梁体在正常活动过程中受双球面的影响,会发生

梁体略微抬高的现象,而这种现象对于公路桥梁还可以接受,但对于铁路桥梁是不允许的.铁路桥梁双曲面球型减隔震支座在普通双曲面球型减隔震支座的基础上,增加了一个平面摩擦副,使支座在正常运行时不发生梁体抬高,地震时具备减隔震功能,同时地震后又具备自复位功能.图6给出了铁路双曲面球型减隔震支座的结构图.



1. 上座板; 2. 中座板; 3. 双球面四氟滑板; 4. 双球面不锈钢滑板; 5. 限位装置; 6. 下座板; 7. 平面不锈钢滑板; 8. 平面四氟滑板; 9. 底座板; 10. 锚固螺栓。

图6 铁路桥梁双曲面球型减隔震支座结构图

Fig. 6 Structural layout drawing of railway bridge double spherical mitigation and isolation bearing

罕遇地震下,铁路双曲面球型减隔震支座均为多向活动支座.支座共包括三个摩擦副,即一个平面摩擦副和两个曲面摩擦副.支座的平面摩擦副两端各有挡块限制,因此平面摩擦副的运动状态可采用弹性连接、钩单元、间隙单元三者并联模拟,曲面摩擦副通过摩擦摆单元模拟.整个多向活动双曲面球型减隔震支座采用弹性连接、钩单元、间隙单元三者并联后再与摩擦摆单元串联模拟.对于固定GD支座无平面摩擦副,无需设置弹性连接、钩单元和间隙单元,罕遇地震下双曲面球型减隔震单元模拟仅为一个多向活动摩擦摆支座.

采用双曲面球型钢支座曲面半径为1.8 m,地震作用下摩擦系数为0.06,支座吨

位为4 500 kN;支座屈服位移为3 mm,初始屈服力可由支座轴力及摩擦系数确定.支座滞回曲线如图7所示.

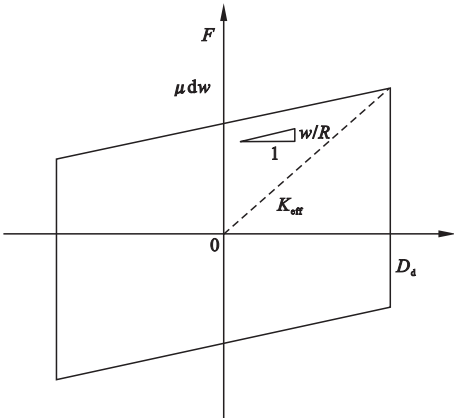


图7 支座滞回曲线图

Fig. 7 Hysteresis curve of bearings

根据初始屈服力和屈服位移就可以确定双曲面支座的初始刚度.时程分析选取人造地震动进行.

支座的屈服后刚度为

$$K_d = \frac{w}{R} \quad (1)$$

等效刚度为

$$K_{\text{eff}} = \frac{w}{R} + \mu_d \frac{w}{D_d} \quad (2)$$

等效阻尼比为

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} \times \frac{\mu_d}{D_d/R + \mu_d} \quad (3)$$

式中: W 为恒载作用下支座竖向反力; R 为滑动曲面的曲率半径; D_d 为支座设计水平位移; μ_d 为滑动摩擦系数.

表5 罕遇地震下减隔震体系中墩墩底内力响应

Table 5 Internal force in middle pier bottom under rarely occurred earthquake						
加速度峰值/g	纵向罕遇地震			横向罕遇地震		
	轴力/	纵向弯	减震率(弯	轴力/	横向弯	减震率(弯
	kN	矩/(kN·m)	矩)/%	kN	矩/(kN·m)	矩)/%
0.57	16 002	55 921	78.9	16 002	62 175	83.8

由表5可以看出,减隔震支座起作用后,对于纵向和横向罕遇地震,减震率分别达到了78.9%和83.8%,墩底内力响应小于多遇地震.由于墩身按多遇地震进行配筋检算.因此,罕遇地震作用下,桥墩仍保持弹性.

由于双曲面减隔震支座减震效果好,罕遇地震下桥墩内力响应小于多遇地震,因此,罕遇地震并不控制设计,不需要采用能力保护原理进行设计.减隔震体系下,直接采用表4中多遇地震计算的桩长和配筋即可,不需要再增加桩基材料用量.因此,采用减隔震支座相当于节省了33.9万元.

考虑到减隔震支座与普通球型钢支座造价的差异,一孔简支梁四个支座造价相差约5万元,因此减隔震体系桥梁,每孔简支梁节省28.9万元,具有较大经济优势.

减隔震桥梁需要满足的性能水准:在小震作用下,结构保持弹性,不需要修复桥梁即

在延性抗震体系计算模型的基础上,替换相应的支座连接单元,得到相应的减隔震简支梁桥整体计算模型.

采用减隔震支座的桥梁,根据我国铁路抗震设计规范,抗震设计分两个阶段.

(1)多遇地震

检算桥墩配筋,由于多遇地震一般不允许减隔震支座发生破坏,减隔震支座性能同普通支座.因此,该设计阶段检算同采用普通支座桥梁.

(2)罕遇地震

检算桥墩是否满足大震不倒的性能水准.表5给出了罕遇地震作用下,中间桥墩墩底内力响应的计算结果.

可立即投入正常使用.因此简支梁减隔震支座的剪断时刻必须要超过多遇地震水平,但是剪力销的设计原则是宜弱不宜强,否则会增加桥墩和基础的破坏风险,在满足小震下的使用功能下,越早断越好.因此选择1.1倍多遇地震时刻支座剪断,减隔震支座发挥作用.表6给出了各个计算工况下,采用减隔震支座桥梁各个构件的运行状态.

表6 采用减隔震支座桥梁各构件受力状态汇总表

Table 6 Forced state of bridge components under different loading cases			
工况	桥墩	桩基情况	支座情况
主力	保持弹性	保持弹性	未剪断
主+附	保持弹性	保持弹性	未剪断
多遇地震	保持弹性	保持弹性	未剪断
1.1倍多遇地震	保持弹性	保持弹性	剪断
设计地震	保持弹性	保持弹性	剪断
罕遇地震	保持弹性	保持弹性	剪断

采用减隔震设计的桥梁,罕遇地震下主梁、桥墩构件均处于弹性无损伤状态,震后只需要更换相应的减隔震装置即可,维修费用低,加固周期也较延性抗震设计大为缩短。

5 延性和减隔震体系对比

已有震害调查表明,简支梁桥的震害主要集中在支座发生滑动破坏,而下部结构的损伤则相对比较轻微。这一现象在集集地震和汶川地震中均有发现,离震中较近的梁式桥损坏模式共同点为梁体与支座之间发生相对滑动,上部结构产生较大的滑动位移,但这些梁桥的桥墩和基础损伤都比较轻微^[20]。分析原因,采用普通支座的桥梁,支座纵、横向限位装置破坏后,固定支座变成滑动支座工作,整个结构体系变成了纯滑动摩擦体系,纯摩擦体系虽然能有效减小桥墩和基础的地震响应,对下部结构有一定的保护作用,但是该体系无恢复力,震后不能回到正常位置。不是一种期望的合理抗震体系。而采用减隔震体系的简支梁桥,大震作用下,支座剪力销剪断,上下支座板滑动,类似于普通支座破坏时情况,减震效果好,有效保护了桥墩和桩基,同时该结构体系具有自恢复能力,大震后修复简单。综合计算每孔造价节省 28.9 万元,经济效果好。

综上所述,两种体系对比如下:

(1)采用普通球形钢支座的桥梁,根据规范要求,按设计地震检算支座,在罕遇地震作用下支座状态未知,受力不明确。而采用双曲面减隔震支座的桥梁,按罕遇地震计算,受力明确。

(2)采用普通球形钢支座的桥梁,罕遇地震作用下,体系无恢复力,震后不能回到正常位置。而采用减隔震支座的桥梁减震效果好,具有自恢复能力,修复简单。

(3)采用双曲面减隔震支座的桥梁每孔简支梁节省造价 28.9 万元,造价更省。

6 结 论

(1)采用双曲面减隔震支座,减震率高,虽然支座造价略贵,但桩基长度和配筋减少,经济性更好。

(2)采用双曲面减隔震支座的桥梁,桥墩保持弹性,支座具有自恢复能力,抗震性能更优。

(3)综合抗震性能和总体造价,减隔震体系均优于延性抗震体系。推荐高烈度震区采用减隔震体系进行设计。

(4)由于简支梁桥为静定结构,采用减隔震支座和普通球型支座桥梁一样均应设置多道抗震防线。应采取有效的纵向防落梁限位装置、横向挡块来对上部结构的位移进行有效约束从而防止落梁。

参考文献

- [1] 杨文武. 台湾高速铁路 C270 标段高架桥设计概述[J]. 铁道学报, 2007(3): 132-136.
(YANG Wenwu. A brief overview of C270 viaduct design of Taiwan HSR project[J]. Journal of the China railway society, 2007(3): 132-136.)
- [2] 谢维鏊. 日本新干线桥梁概况[J]. 铁道勘察与设计, 2000(4): 10-17.
(XIE Weiliu. Overview of Japan Shinkansen bridge[J]. Railway investigation and surveying, 2000(4): 10-17.)
- [3] 管仲国, 李建中. 城市高架桥合理抗震体系与经济性对比[J]. 地震工程与工程振动, 2011(3): 91-98.
(GUAN Zhongguo, LI Jianzhong. Structural performance and cost comparison of different seismic resisting systems for urban expressway viaducts[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2011(3): 91-98.)
- [4] MITOULIS S A, TEGOS I A, STYLIANIDIS K C. Cost-effectiveness related to the earthquake resisting system of multi-span bridges [J]. Engineering structures, 2010, 32(9): 2658-2671.
- [5] KRISHNAMOORTHY A. Seismic response of a bridge with friction pendulum isolator system [J]. Journal of structural engineering, 2010, 37(2): 110-116.

- [6] 陈令坤,蒋丽忠,余志武,等. 高速铁路简支梁桥地震反应特性研究[J]. 振动与冲击, 2011(12):216-222.
(CHEN Lingkun, JIANG Lizhong, YU Zhiwu, et al. Seismic response characteristics of a high-speed railway simply-supported girder bridge [J]. Journal of vibration and shock, 2011(12):216-222.)
- [7] 孟兮,高日,李承根. 铁路简支梁桥中减震棒的设计及其减震性能研究[J]. 桥梁建设, 2014(3):81-86.
(MENG Xi, GAO Ri, LI Chengen. Design and seismic mitigation performance study of shock absorber for railway simply-supported beam bridge [J]. Bridge construction, 2014(3):81-86.)
- [8] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程抗震设计规范:GB 50111—2006[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
(Ministry of Railway of the People's Republic of China. Railway engineering seismic design code: GB 50111—2006 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009).
- [9] MARIN-ARTIEDA C C, WHITTAKER A S, CONSTANTINOU M C. Experimental study of the XY-friction pendulum bearing for bridge applications[J]. Journal of bridge engineering, 2009, 14(3):193-202.
- [10] AMIRI G G, SHALMAEE M M, NAMIRANIAN P. Evaluation of a DDB design method for bridges isolated with triple pendulum bearings[J]. Structural engineering and mechanics, 2016, 59(5):803-820.
- [11] YURDAKUL M A, ALTUNISIK A C S. Comparison of the dynamic responses of glburnu highway bridge using single and triple concave friction pendulums [J]. Earthquake and structures, 2014, 7(4):511-525.
- [12] SHEN X, WANG X, YE Q. Seismic performance of transverse steel damper seismic system for long span bridges [J]. Engineering structures, 2017, 141:14-28.
- [13] FILIPOV E T, REVELL J R, FAHNESTOCK L A. Seismic performance of highway bridges with fusing bearing components for quasi-isolation[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2013, 42(9):1375-1394.
- [14] KIM S H, MHA H S, LEE S W. Effects of bearing damage upon seismic behaviors of a multi-span girder bridge[J]. Engineering structures, 2006, 28(7):1071-1080.
- [15] European Committee for Standardization. Euro-code 8: Design of structures for earthquake resistance, part 2: bridges; BS EN 1998—2[S]. ISBN: [s. n.], 2005.
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design; LFRDUS—5[S]. ISBN: [s. n.], 2012.
- [17] 中交路桥技术有限公司. 公路工程抗震规范: JTGB02—2013[S]. 北京:人民交通出版社, 2014.
(Road and Bridge Consultants Co., Ltd. of China Communications Construction Company. Specification of seismic design for highway engineering: JTGB02—2013 [S]. Beijing: China Communication Press, 2014.)
- [18] 王国新,鲁建飞. 地震动输入的选取与结构响应研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(1):15-22.
(WANG Guoxin, LU Jianfei. Strong ground motion input and structural response [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(1):15-22.)
- [19] 刘德稳,王琼芬,吴跃红,等. 不规则结构隔震设计与研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6):1041-1046.
(LIU Dewen, WANG Qiongfen, WU Yuehong, et al. Design and research of irregular isolation structure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(6):1041-1046.)
- [20] 朱颖,魏永幸. 汶川地震铁路工程震害特征及工程抗震设计对策思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(5):3378-3386.
(ZHU Ying, WEI Yongxing. Characteristics of railway damage due to Wenchuan earthquake and countermeasure considerations of engineering seismic design [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010(5):3378-3386.)