

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201906044

软土地区高墩梁桥抗震支座选型及横向约束构造研究*

周 敕¹, 朱国强¹, 刘平均², 吴 江¹, 卢 伟¹

(1. 长安大学旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 为了研究软土地区地震作用下高墩先简支后桥面连续梁桥的支座选型及横桥向抗震约束问题, 选取了普通板式橡胶支座、钢阻尼滑板支座、LNR橡胶支座和HDR高阻尼支座四种支座类型, 以软土地区某(4×30) m跨径高墩先简支后桥面连续梁桥为例, 进行了延性抗震体系和减隔震体系抗震设计对比以及设置挡块的横桥向抗震约束效果研究。结果表明: 软土地区高墩先简支后桥面连续梁桥墩柱配筋率主要由E1地震作用下墩底截面偏心受压检算工况决定, 采用减隔震体系并不能降低桥墩配筋率。通过对采用四种不同支座桥梁的内力、墩梁相对位移以及配筋率方面综合分析可知, 软土地区高墩先简支后桥面连续梁桥的周期较长, 这类桥梁抗震关键问题是防止落梁、减小墩顶位移。采用普通板式橡胶支座并合理的设计纵横向防落梁装置的延性抗震体系更适宜于软土地区高墩梁式桥, 合理设计抗震挡块可以起到很好的横向约束作用, 避免横向落梁的发生。

关键词: 高墩梁桥; 延性抗震; 支座选型; 横向约束; 墩柱配筋率

中图分类号: U44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-0936-10

Research on Seismic Bearing Type Selection and Transverse Restraint Structure of High Pier Beam Bridge in Soft Soil Area

ZHOU Mi¹, ZHU Guoqiang¹, LIU Pingjun², WU Jiang¹, LU Wei¹

(1. Key Laboratory for Old Bridge Detection and Reinforcement Technology of the Ministry of Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Power China Road Bridge Group Limited Company, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to study the bearing type selection and transverse seismic restraint of bridge deck continuous simply-supported girder bridge with high piers under earthquake in soft soil area, this paper selected four types of bearings, including ordinary laminated bearings, steel damped sliding bearings, LNR rubber bearings, and HDR high damped bearings, and took a 4*30m girder bridge of bridge deck continuous simply-supported girder bridge with high piers in soft soil area as an example. This paper studied the seismic design comparison of the ductile seismic system and seismic isolation system and the seismic restraint effect of transverse with the blocks. The results show that the reinforcement ratio of the piers of bridge deck continuous simply-supported girder bridge with high piers in the soft-soil area is determined by the eccentric compression work condition of the bottom of the piers under

* 收稿日期: 2019-06-15; 修回日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978062)、陕西省重点研发计划项目(2019KW-051)、陕西省创新人才推进计划-科技创新团队(2018TD-040); 长安大学中央高校基本科研业务费专项项目(300102210513)资助

作者简介: 周敕(1977—)男, 教授, 博导, 博士。主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail:zhoumi@chd.edu.cn

the E1 earthquake, using seismic isolation system cannot reduce the reinforcement of the pier. Through comprehensive analysis of internal force, relative displacement between piers and girders and reinforcement ratio of four kinds of bridges with different supports, it can be seen that the period of high piers in soft soil area is longer, and the key problem of seismic resistance of such bridges is unseating prevention and reduce displacement of pier top. The ductile seismic system with laminated bearing and reasonable design of longitudinal and transverse unseating prevention device is more suitable for high pier beam bridge in soft soil areas, and rational design of the blocks can play a very good role of lateral restraint and avoid the occurrence of transverse unseating.

Keywords: high-pier beam bridge; ductile seismic; bearing type selection; transverse restraint; pier column reinforcement ratio

引言

我国属于地震多发国家,地震频繁发生,桥梁结构在强烈地震发生后损伤严重。先简支后桥面连续梁桥在我国占有非常重要的作用,有时因为地形地势的原因,需要把桥梁设计为高墩桥梁。高墩梁桥墩体自重大,柔度大,阻尼小,墩顶还要承载上部结构荷载和车辆荷载,形成一个对于承受水平作用力,特别是对抗震不利的倒摆式结构^[1],在地震作用下,墩梁相对位移比较大,比较容易落梁。又由于软土的物理力学特性差,具有高含水率、高孔隙比及粘着力小、强度低等特点^[2]。软土地场在进行桩基设计时,需要考虑地震下砂土液化和桩周负摩阻力的影响,软土地场桩基的理论嵌固点远远超出正常3~5倍桩径范围,这样当采用桩柱式桥墩形式时,由于桩基在地面线以下一定深度内桩周土的约束作用很小,无形中增大了桥墩高度;同时对软土地场,采用减隔震体系造成结构周期的放大反而是不利的。

目前专家学者对常规简支桥梁的支座选型和合理抗震体系进行了深入的研究,同时对常规简支桥梁的横向碰撞约束也进行了相应的研究。徐略勤等^[3]探讨了不同碰撞条件下梁桥横向地震力分布的变化规律,H.Hao等^[4]回顾了桥梁结构和碰撞模型的数值模拟、桥梁结构不同构件间碰撞响应的数值模拟、试验研究和碰撞缓解方法。S.Maleki^[5]在考虑支座的基础上对梁桥中的横向约束的约束刚度、间隙距离以及桥的周期作为可变参数进行地震力作用下的受力性能研究。但是对高墩梁桥的支座选型和横向碰撞约束的研究却很少^[6-7],软土地区高墩简支梁桥的相关研究更少。同时行业推荐标准《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T2231-01-2020)^[8]中未对高墩桥梁抗震设计理论及方法做出具体的指导说明,并且缺少相应的设计参考资料^[9]。

本文以某软土地区4×30 m跨径高墩先简支后桥面连续梁桥为研究对象,对其支座选型和横向约束进行分析,通过结构受力和变形的指标对抗震性能进行评判,得到该高墩先简支后桥面连续梁桥的最合适支座和抗震设计方法,并对抗震横向约束进行验证说明。为同类高墩先简支后桥面连续梁桥的合理抗震设计提供参考。

1 支座及横向挡块恢复力模型

1.1 板式橡胶支座

板式橡胶支座主要通过钢板约束橡胶层的横向膨胀变形提高支座的承载能力,通过橡胶的剪切和压缩变形分别适应桥梁水平位移和转角的要求。考虑到板式橡胶支座^[10]在罕遇地震作用下会发生滑动,本文选用理想弹塑性恢复力模型,恢复力模型如图1所示,文中采用板式橡胶支座型号为GJZ-350×550×99,支座参数见表1。

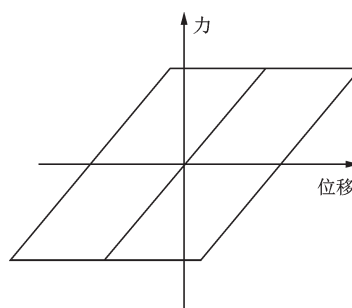


图1 板式橡胶支座恢复力模型

Fig.1 Restoring force model of the laminated bearing

表1 板式橡胶支座参数

Table 1 Laminated bearing parameters table

参数	容许剪切 位移/m	支座总 高/m	竖向刚度/ (kN·m ⁻¹)	水平刚度/ (kN·m ⁻¹)
取值	0.07	0.2	5 772 000	3 300

1.2 LNR 水平力分散型橡胶支座

LNR(Linear Natural Rubber)水平力分散型橡胶支座是借鉴了“水平力分散”的工作原理,能满足较大的剪切位移,且与主梁、墩台进行有效连接,确保桥梁上部结构有效传力至下部结构,实现了桥梁下部结构水平力分散,各墩协同抵抗水平力。LNR水平力分散型橡胶支座^[11]不具有显著的阻尼性能,选用线性恢复力模型,恢复力模型如图2所示,文中所用LNR水平力分散型橡胶支座型号为(LNR-370×470×147),支座参数见表2。由于LNR水平力分散型橡胶支座名称过长,故本文以下部分简称为LNR橡胶支座。

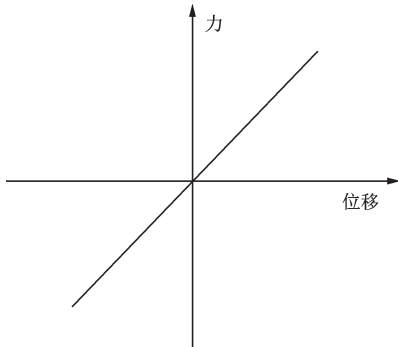


图2 LNR橡胶支座恢复力模型

Fig.2 Restoring force model of the LNR rubber bearing

表2 LNR橡胶支座参数

Table 2 LNR rubber bearing parameters table

参数	容许剪切位移/m	支座总高/m	竖向设计刚度/(kN·m ⁻¹)	水平等效刚度/(kN·m ⁻¹)
取值	0.12	0.147	794 000	1 960

1.3 HDR 高阻尼支座

HDR(High Damping Rubber)高阻尼橡胶支座^[12]是采用高阻尼橡胶材料与钢板等结构件硫化而成的一种橡胶支座,具备良好的阻尼性能,通过高阻尼橡胶在水平方向的大位移剪切变形及滞回耗能实现减震功能,在地震中可以有效地吸收地震能量、减轻地震响应,通常把其非线性变化模拟为双线性恢复力模型,恢复力模型如图3所示,文中所用高阻尼支座型号为HDR(I)370×470×187-G1.0,支座参数见表3。

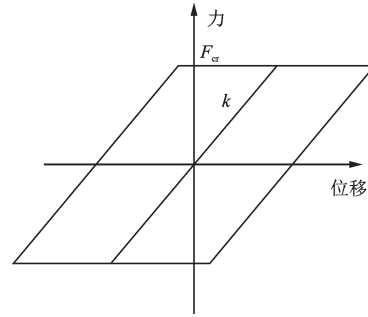


图3 HDR高阻尼支座恢复力模型

Fig.3 Restoring force model of the HDR High damping bearing

表3 HDR型高阻尼支座参数

Table 3 HDR High damping bearing parameters table

参数	屈服力/kN	屈服前刚度/(kN·m ⁻¹)	屈服后刚度/(kN·m ⁻¹)	等效刚度/(kN·m ⁻¹)	等效阻力比/%
取值	81	9 540	1 470	1 960	15

1.4 钢阻尼滑板支座

钢阻尼滑板支座^[13]是在普通滑板支座的基础上通过附加钢阻尼元件研制的一种支座,在实现所有支座的功能外,还能在地震作用时通过支座的摩擦滑动和钢阻尼元件的塑性变形隔离和消耗地震能量,可实现支座的减隔震功能,通过研究滞回曲线可以得到其恢复力模型可以采用双线性恢复力模型,恢复力模型如图4所示,钢阻尼滑板支座选用参数见表4。

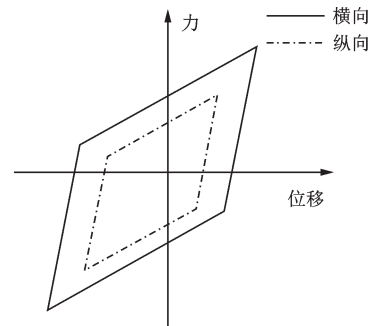


图4 钢阻尼滑板支座恢复力模型

Fig.4 Restoring force model of the steel damping bearing

1.5 混凝土挡块的力学性能

S.H.Megally等^[14-15]根据研究成果,提出采用简化的力学模型模拟挡块的力学性能,并通过试验得到的力与位移关系滞回曲线验证了该简化模型的合理性。R.K.Goel等^[16]采用上述简化混凝土力学模型验证了挡块对常规桥梁的重要性。本文同时结合徐

表4 钢阻尼滑板支座参数

Table 4 Steel damping bearing parameter table

墩号	方向	屈服力/ kN	屈服前刚 度/(kN·m ⁻¹)	屈服后刚度/ 屈服前刚度
1、5	纵向	80	5 333.34	0.03
	横向	150	10 000	0.03
2、3、4	纵向	40	2 666.67	0.03
	横向	80	5 333.34	0.03

略勤等^[17]的混凝土挡块研究成果,采用混凝土挡块的简化分析模型如图5所示,挡块计算参数见表5。

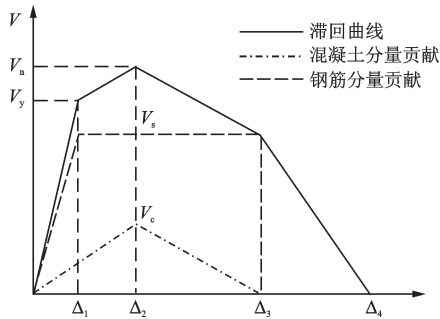


图5 混凝土挡块恢复力模型

Fig.5 Concrete block restoring force model

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = 0.2\sqrt{f'_c}bh \quad (2)$$

$$V_s = [T_1h + T_2(d \sin\theta + h \cos\theta) + T_s/2s(n_n h^2 + n_v d^2)] \frac{1}{h+a} \quad (3)$$

$$V_y = V_s + V_c \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \quad (4)$$

$$\Delta_1 = \sqrt{2} \epsilon_y (L_d + L_a) \frac{h+d}{\sqrt{h^2 + d^2}} \quad (5)$$

$$\Delta_2 = \sqrt{2} \epsilon_y (L_d + L_a) \frac{h+d}{s} \quad (6)$$

$$\Delta_3 = \sqrt{2} \epsilon_s (L_d + L_a) \frac{h+d}{s} \quad (7)$$

$$\Delta_4 = \sqrt{2} \epsilon_u (L_d + L_a) \frac{h+d}{s} \quad (8)$$

式中, V_n 为混凝土挡块的抗剪强度; V_y 为穿过主裂缝的水平钢筋开始屈服时,混凝土挡块的屈服强度; V_c 、 V_s 分别为混凝土和钢筋的剪力分项; Δ_1 为水平钢筋开始屈服时混凝土挡块的水平位移,即挡块的屈服变形; Δ_2 为受力水平钢筋均达到屈服时混凝土挡块水平位移,即挡块的名义变形; Δ_3 为混凝土退出工作以及钢筋开始断裂时混凝土挡块水平

位移,即挡块的退化变形; Δ_4 为混凝土挡块极限水平变形量,即挡块的极限变形; f'_c 为混凝土的抗压强度; b 为挡块的宽度; h 为盖梁上斜裂缝发展的竖向高度; d 为斜裂缝发展的水平长度; T_1 为挡块下盖梁上端水平拉筋的拉力; T_2 为混凝土挡块内剪切钢筋的拉力; T_s 为盖梁内单根分布钢筋的拉力; s 为水平和竖向分布钢筋的间距; n_v 、 n_n 分别为盖梁内竖向和水平分布钢筋的数量; θ 为混凝土挡块内侧面与竖直平面的夹角; a 为挡块的受力点到盖梁顶面的距离; L_a 为盖梁裂缝发展区域的宽度; L_d 为钢筋锚固长度; ϵ_y 为混凝土挡块中剪切钢筋的屈服应变; ϵ_s 为钢筋开始断裂时的应变; ϵ_u 为剪切钢筋的极限应变。

表5 混凝土挡块参数

Table 5 Concrete block parameters table

参数	V_c /kN	V_s /kN	Δ_1 /mm	Δ_2 /mm	Δ_3 /mm	Δ_4 /mm
取值	795	4 971	1.96	12.78	51.11	191

1.6 横向接触单元模拟

挡块和梁体之间的接触^[18-20]采用连接单元 Gap 来模拟。Gap 单元行为描述如下:

$$f = \begin{cases} k(d - gap) & d - gap \geq 0 \\ 0 & d - gap < 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, gap 为间隙单元参数,表示为挡块与梁体之间的间隙;刚度参数 k 是线性弹簧模型中弹簧部分的刚度。

Gap 单元采用线性弹簧模型,即弹簧与间隙单元串联的形式,如图6所示。

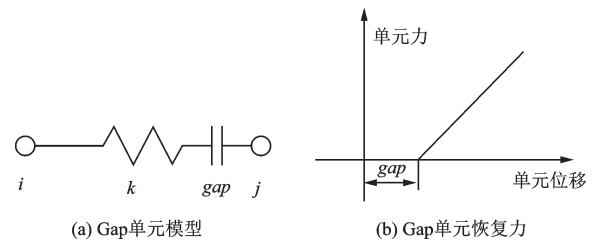


图6 Gap 单元模型和恢复力

Fig.6 Gap unit model diagram and restoring force model

2 全桥动力分析模型

2.1 工程概况

根据区域地质资料、勘察钻探揭露,桥址区地

层分布复杂,覆盖层厚度较大,坡体整体相对稳定,场地内软土多为海相淤泥、淤泥质土以及海陆交互相沉积淤泥质土层,厚度多为22.7~29.30 m。

本文研究桥梁上部结构跨径组合为4×30 m,墩高为25~32 m,上部结构采用预应力混凝土小箱梁,先简支后桥面连续,桥面净宽:2×净15.25 m,下部结构采用柱式墩,墩台采用桩基础。行车速度为100 km/h的高速公路标准,设计荷载为公路-I级。地震动峰值加速度值为0.2g。桥梁总体布置如图7所示。

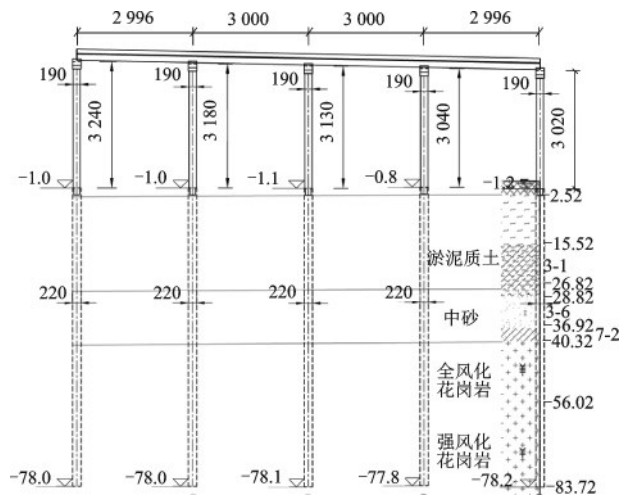


图7 桥梁总体布置

Fig.7 Overall layout of the bridge

2.2 空间动力模型

通过CSiBridge建立动力空间计算模型,有限元计算模型以顺桥向为X轴,横桥向为Y轴,竖向为Z轴。计算模型的梁体和墩柱采用空间梁单元模拟,二期铺装采用线荷载和面荷载进行模拟,作用于主梁上,墩柱和梁体的单元划分反映结构的实际动力特性,板式橡胶支座采用理想双线性连接单元模拟、LNR橡胶支座采用线性连接单元模拟,HDR高阻尼支座、钢阻尼滑板支座采用双线性连接单元模拟,能正确反映支座的力学特性,挡块和盖梁进行刚接,同时把梁体和挡块用Gap接触单元连接。

进行时程分析时,采用瑞利阻尼,支座单元正确反映支座的力学特性。桥梁采用桩柱式基础,根据桥址区地质分层及液化情况,采用分层土弹簧模型对桩基进行土层作用力模拟,竖向每隔2 m施加一个土弹簧,土层m值按照地勘报告确定,同时考

虑软土地区地基液化的影响,有限元模型和模型细节如图8、9所示。



图8 全桥有限元模型

Fig.8 Finite element model of the whole bridge

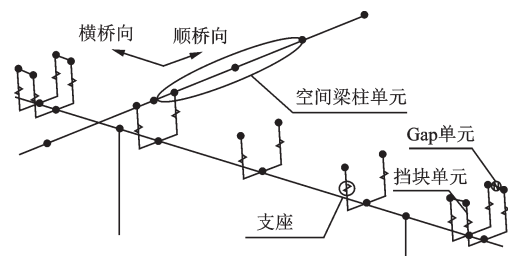


图9 模型细节

Fig.9 Details of the model

2.3 地震动输入

本文采用反应谱法和非线性时程分析方法对桥梁结构进行了地震反应分析,研究了该桥在E1地震(50年超越概率10%)和E2地震(50年超越概率2.5%)两种设防水准地震输入下的地震响应。

根据该桥桥址处的“地震安评报告”,工程场地阻尼比为0.05的水平设计加速度反应谱由下式确定:

$$S_a(T) = \begin{cases} S_{Amax}(0.45 + 5.5T) & 0 < T \leq 0.1s \\ S_{Amax} & 0.1s < T \leq T_g \\ S_{Amax}(T_g/T)^\gamma & T_g < T \leq 10s \end{cases} \quad (10)$$

式中, S_{Amax} 为水平设计加速度反应谱最大值; T_g 为特征周期(单位s); T 为结构自振周期(单位s)。

在进行非线性时程分析时通常要选择合适的地震动,为体现不同地震动的随机性,在本桥设计中E1地震(50年超越概率10%)和E2地震(50年超越概率2.5%)下各选择3条地震动,E2地震加速度时程曲线如图10所示。计算时地震动输入分别采取纵向与横向两种方式,并取前500阶模态分析,振型组合采用CQC法,方向组合采用SRSS法。

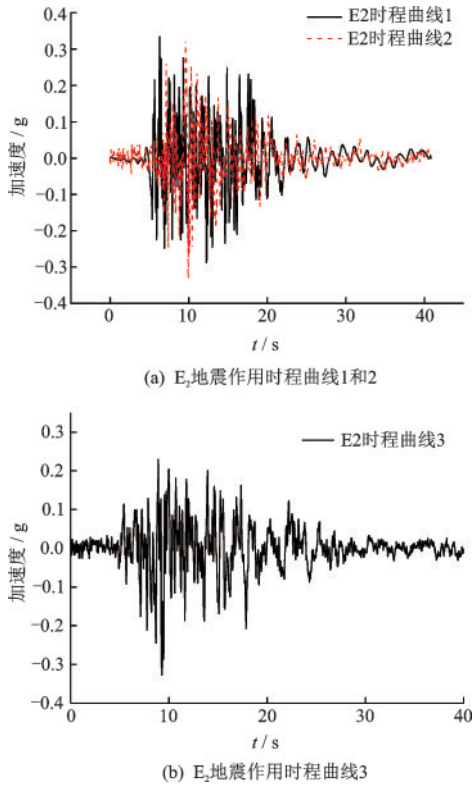


图10 E2地震作用时程曲线
Fig.10 Time history curves of earthquake action E2

3 支座抗震分析与经济分析

3.1 支座造价比较

成本投入是工程建设中需要考虑的重要因素,投资和效益的优劣性对工程建设方案的选择起着重要的作用。在桥梁的抗震设计中,桥梁的抗震设防等级和所处地区的地震烈度是影响桥梁设计资金投入的最根本因素。地震烈度是无法人为选择的,抗震设防等级则主要是依据桥梁的重要性、国家或者地区的经济承受能力决定^[21]。本文考虑在使用不同支座方案下,对工程造价带来的影响。采用每种支座市场价格的均值作为标准,不同支座布置方案的支座总造价比较见表6,使用板式橡胶支座具有明显经济性。

表6 不同支座造价
Table 6 Different bearing costs

支座类型	单价/(元)	布置个数	总价/(元)
普通板式橡胶支座	1 400	40	56 000
LNR 橡胶支座	5 000	40	200 000
HDR 高阻尼支座	11 000	40	440 000
钢阻尼滑板支座	8 000	40	320 000

注:表中支座价格仅供参考,实际造价存在一定的波动性

3.2 多遇地震作用下墩柱研究

采用非线性时程地震反应分析方法,对动力模型进行了非线性地震反应分析,考虑横桥向与竖直方向进行组合,采用计算结果的最大值,获得在地震作用下结构的动力响应和安全性能是否满足规范与正常使用的要求。同时由于研究桥梁为高墩桥梁,墩底截面进行偏心受压的验算。桥墩截面计算与墩底偏心受压计算选用的同为墩底截面,桥墩截面计算与墩底偏心受压计算选用的同为墩底截面,桥墩截面计算是按照《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)7.4.7和7.4.8进行弯矩一曲率分析来计算桥墩截面的抗震弯矩承载能力是否满足地震需求。墩底偏心受压计算是按《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)7.3.1条文要求,在E1地震作用和永久作用组合后为了保证墩柱不发生偏心受压破坏。由于桥墩截面、桩基截面和墩底偏心受压验算具有相同的规律,本文只列出桥墩截面的能力需求比值如图11所示。同时为了说明墩柱的配筋率问题,选用板式橡胶支座的桥墩截面、桩基截面和墩底截面偏心受压能力需求比值进行对比如图12所示。

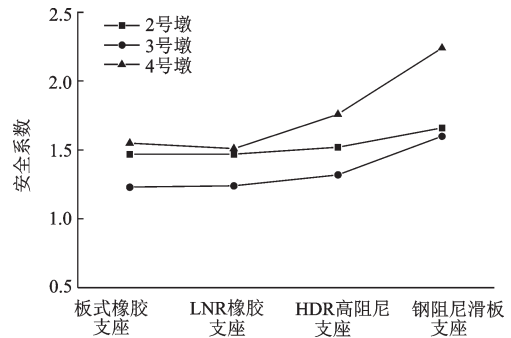


图11 各支座下桥墩截面能力需求比
Fig.11 Demand-capacity ratio of cross section of piers under each bearing

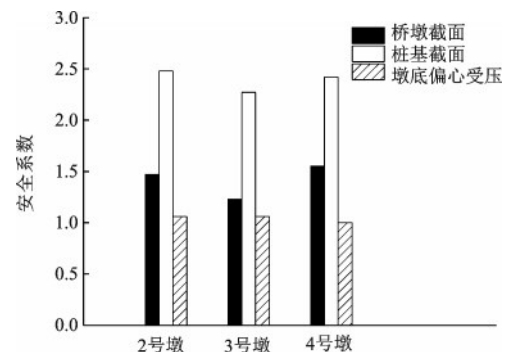


图12 桥墩截面、桩基截面、墩底偏心受压能力需求比
Fig.12 Demand-capacity ratio of pier sections pile foundation sections and eccentric compressive at pier bottom

由图 11 可以得出,在多遇地震作用下,选用板式橡胶支座、LNR 橡胶支座、HDR 高阻尼支座以及钢阻尼滑板支座桥梁的桥墩截面的安全系数比较接近,都在 1.3 以上,都能满足抗震设计要求,桩基截面以及墩底偏心受压也具有同样的规律,安全系数都在 1 以上,满足抗震设计要求。同时可以从图 12 中看出同桥墩截面和桩基截面相比墩底偏心受压的安全系数最小,只是刚刚大于 1。因此可以得出对于本文研究高墩桥梁的墩柱配筋率主要由墩底偏心受压验算控制。

3.3 罕遇地震作用下墩柱研究

采用非线性时程地震反应分析方法,对桥梁动力模型进行了非线性地震反应分析,考虑沿水平桥向与竖直方向进行组合,采用 3 组时程波计算,结果

取 3 组计算结果的最大值。通过全桥模型来读取墩底和桩顶的内力,并得到墩梁相对位移,以及获得在地震作用下结构的动力响应和安全性能的能力需求比,可得到在罕遇地震作用下桥墩的受力特性与性能。

3.3.1 罕遇地震作用下关键截面内力分析

从表 7 和表 8 可知,在罕遇地震荷载作用下,钢阻尼滑板支座桥梁的关键截面内力最小,其次是 HDR 高阻尼支座桥梁,然后是 LNR 橡胶支座桥梁,板式橡胶支座关键截面内力最大。钢阻尼滑板支座桥梁的关键截面内力比板式橡胶支座桥梁内力减小 15%~25%,LNR 橡胶桥梁的关键截面内力比板式橡胶支座桥梁内力减小 4%~15%,HDR 高阻尼桥梁的关键截面内力比板式橡胶支座桥梁内力减小 10%~20%。

表 7 地震作用下墩底内力

Table 7 Internal forces at the pier bottom under earthquake action

桥墩号	内力	板式橡胶支座		LNR 橡胶支座		HDR 高阻尼支座		钢阻尼滑板支座	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
2#	剪力/kN	1 280	1 974	1 188	1 840	1 029	1 839	1 056	1 526
	弯矩/(kN·m)	24 853	26 301	23 846	23 918	22 829	20 629	20 956	21 107
3#	剪力/kN	1 302	2 303	1 198	1 945	1 102	1 889	1 089	1 550
	弯矩/(kN·m)	25 922	27 968	23 585	24 856	23 922	21 867	20 649	20 891
4#	剪力/kN	1 496	1 900	1 287	1 790	1 224	1 530	1 131	1 592
	弯矩/(kN·m)	24 582	25 219	23 018	22 458	22 105	20 068	19 086	20 431

表 8 地震作用下桩顶内力

Table 8 Internal force of the pile top under earthquake action

桥墩号	内力	板式橡胶支座		LNR 橡胶支座		HDR 高阻尼支座		钢阻尼滑板支座	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
2#	剪力/kN	1 700	2 514	1 670	2 175	1 185	2 422	1 570	1 930
	弯矩/(kN·m)	27 698	11 025	26 330	9 802	24 856	7 691	22 111	7 895
3#	剪力/kN	1 852	2 356	1 700	2 258	1 291	2 164	1 625	2 038
	弯矩/(kN·m)	29 540	11 247	27 590	9 758	25 876	7 825	23 522	7 876
4#	剪力/kN	1 745	2 148	1 699	2 001	1 484	2 032	1 561	1 805
	弯矩/(kN·m)	27 586	11 458	26 478	9 541	24 737	7 682	22 484	7 509

在地震作用下板式橡胶支座通过钢板约束橡胶层的横向膨胀变形来提高支座的承载能力,通过橡胶的剪切和压缩变形分别适应桥梁水平位移和转角的要求,并不具备消耗地震能量的作用,因此在 E2 地震作用下采用板式橡胶支座时各桥墩内力最大。LNR 支座可以使主梁、墩台进行有效连接,确保桥梁上部结构有效传力至下部结构,实现了桥

梁下部结构水平力分散,使各墩协同抵抗水平力,地震内力次之。HDR 高阻尼橡胶支座具备良好的阻尼性能,在地震作用下高阻尼橡胶在水平方向发生大位移剪切变形实现减震功能,同时具有良好的滞回耗能,可以有效地吸收地震能量,减小截面受力,桥墩地震内力较小。钢阻尼滑板支座在地震作用时通过支座的摩擦滑动和钢阻尼元件的塑性变

形隔离和消耗地震能量,减隔震功能强、桥墩地震内力最小。从各种支座的工作机理分析也可得到相同的关键截面内力大小顺序。

3.3.2 罕遇地震作用下墩梁相对位移对比分析

从图 13 可得,板式橡胶支座桥梁,LNR 橡胶支座桥梁,HDR 高阻尼支座桥梁纵桥向墩梁相对位移差距不明显,都在 0.7 m 左右。钢阻尼滑板支座桥梁纵桥向墩梁相对位移与前三种支座桥梁相比,纵桥向墩梁相对位移显著减小,其最小位移为 0.217 m。而在横桥向普通板式橡胶支座桥梁,LNR 橡胶支座桥梁,HDR 高阻尼支座桥梁横桥向墩梁相对位移差距不明显,为 0.2~0.4 m。

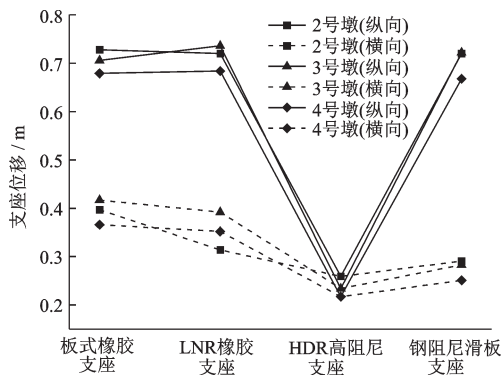


图 13 罕遇地震作用下墩梁相对位移

Fig.13 Relative displacements between piers and girders under rare earthquake action

3.3.3 罕遇地震作用下桥墩进入塑性程度计算

在现有的墩柱配筋率情况下,对墩柱进入塑性程度进行计算,结果如图 14 所示,其中,桥墩截面的配筋率为 1.22 %。

从图 14 和表 9 可知,4 种支座桥梁在罕遇地震荷载作用下,桥墩截面均屈服。其中,进入塑性程度最严重的是板式橡胶支座桥梁,罕遇地震作用下

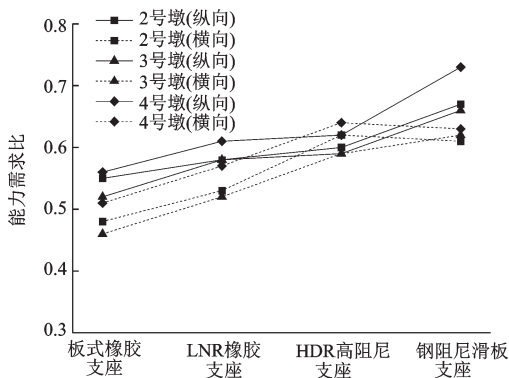


图 14 桥墩弯矩能力需求比

Fig.14 Demand-capacity ratio of bridge pier bending moment

表 9 不同抗震体系墩柱配筋率

Table 9 Reinforcement ratio of piers in different seismic systems

支座类型	墩柱配筋率	
	延性抗震设计	减隔震抗震设计
普通板式橡胶支座	1.22%	—
LNR 橡胶支座	—	2.54%
HDR 高阻尼支座	—	2.38%
钢阻尼滑板支座	—	2.17%

能力需求比值为 0.46。其次是 LNR 橡胶支座桥梁能力需求比值为 0.52,HDR 高阻尼支座桥梁能力需求比值为 0.59,钢阻尼滑板支座桥梁能力需求比值为 0.61。虽然 LNR 橡胶支座桥梁、HDR 高阻尼支座桥梁、钢阻尼滑板支座桥梁的弯矩能力需求比比板式橡胶支座桥梁高,但也不同程度的进入了塑性,这不符合减隔震抗震设计思想。若满足减隔震抗震设计使墩柱基本保持弹性,LNR 橡胶支座桥梁桥墩截面需要的配筋率为 2.54%,HDR 高阻尼桥梁桥墩截面需要的配筋率为 2.38%,钢阻尼滑板支座桥梁桥墩截面需要的配筋率为 2.17%,势必造成工程造价的增加,在经济上很不划算。

本文研究高墩梁桥处于软土地区,桥梁自振周期较长,如果进行减隔震设计会使振动周期更长,势必会使桥梁位移增加,可能会造成落梁震害的发生。同时减隔震支座的施工繁琐、难度加大、使用寿命较短,维修和更换费用较大,会造成造价上的经济损失。结合地震作用下墩柱的抗震性能分析,最后选用板式橡胶支座作为高墩先简支后桥面连续桥梁的支座,采用延性抗震设计体系。

通过全桥模型自振特性分析,可知依托工程前 5 阶主要振型模态,具体数值见表 10。

表 10 桥梁动力特性

Table 10 Dynamic characteristics

阶次	周期/s	振型描述
1	3.969 66	主梁纵向摆动
2	2.400 83	主梁纵向摆动
3	1.916 49	主梁横向摆动
4	1.731 75	主梁横向摆动
5	1.512 73	主梁横向摆动

4 桥梁横向约束体系

高墩先简支后桥面连续桥梁中可以采用板式

橡胶支座加强挡块的理念来进行横向约束设计。在罕遇地震作用下,板式橡胶支座的抗滑摩阻力不满足地震水平力需求,板式橡胶支座产生滑移。当板式支座产生横向滑移时,由于有横向防震挡块限位的作用,支座与挡块之间形成共同受力,保证延性体系的传力途径。支座与挡块共同受力的情况下,考虑挡块承受的抗剪设计值为扣除支座滑动摩擦部分水平地震力。地震作用下桥梁挡块受力见表11。

从表11中可以看出在罕遇地震作用下挡块所受剪力都没有超过挡块强度,其中2号墩左端的挡块受力最大为2917 kN,不会发生脆性剪切破坏,不会造成地震作用下落梁事故的发生。因

表11 罕遇地震作用下挡块所受剪力

Table 11 Shear forces of the blocks under the rare earthquake action

桥墩	挡块所受剪力/kN	挡块强度/kN
2#左端	2 917	5 766
2#右端	1 867	5 766
3#左端	1 377	5 766
3#右端	2 181	5 766
4#左端	2 011	5 766
4#右端	1 607	5 766

此通过以上分析可以得出板式橡胶支座和挡块的约束体系在地震作用下可以起到很好的横向约束作用。

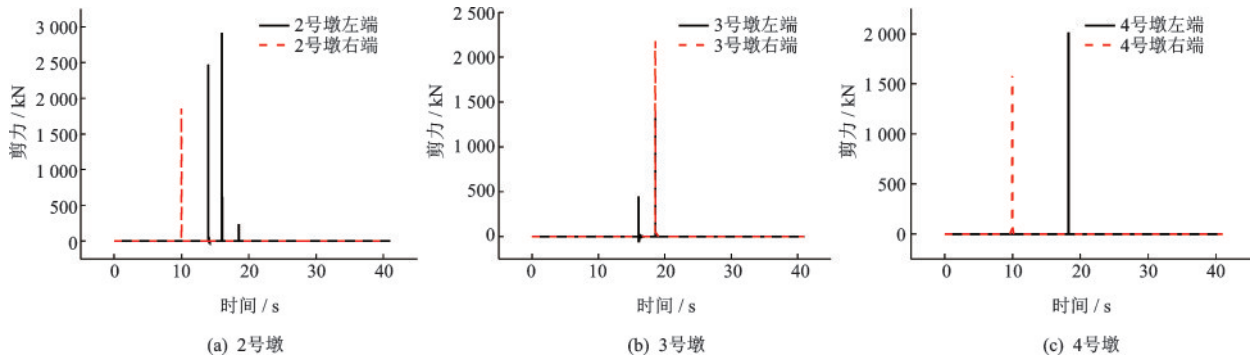


图15 地震作用下挡块剪力历程

Fig.15 Time-history diagram of the shear force of the blocks under earthquake action

5 结论

以某软土地区4×30 m跨径高墩先简支后桥面连续梁桥为对象,对比研究了地震作用下采用4种支座桥梁受力和位移情况,并对板式橡胶支座和挡块组成的横向约束进行分析,得到如下结论:

(1)对于软土地区的高墩先简支后桥面连续梁桥,墩柱配筋率主要是由E1地震作用下的墩底截面的偏心受压验算控制的。

(2)在E2地震作用下,钢阻尼滑板支座桥梁、LNR支座桥梁、HDR支座桥梁的桥墩内力比板式橡胶支座桥梁内力分别减小15%~25%、4%~15%、10%~20%。但由于采用了减隔震支座的桥梁设防标准的提高,实际上反而需要更高的配筋率以保证桥墩处于弹性工作状态。

(3)采用板式橡胶支座的桥梁和采用其他支座的桥梁纵桥向墩梁相对位移都在0.7 m左右,钢阻尼滑板支座桥梁纵桥向墩梁相对位移相对较小,为

0.217 m。而在横桥向4种支座桥梁横桥向墩梁相对位移差距不明显,均为0.2~0.4 m。

(4)软土地区的高墩先简支后桥面连续梁桥,与采用延性抗震设计相比,减隔震抗震设计会使桥梁墩柱配筋率增大,经济性较差。同时会使桥梁的振动周期变长,可能导致墩梁的位移过大,发生落梁震害。综合考虑工程造价和桥梁抗震性能,本文建议此类桥梁优先选用板式橡胶支座进行延性抗震设计。

(5)从横桥向受力分析可知,使用板式橡胶支座和挡块组成的约束体系可以起到很好的横向约束作用。

参考文献:

[1] 李睿,宁晓骏,叶燎原,等.高墩桥梁的地震反映分析[J].昆明理工大学学报,2001,26(6):86-89.
Li R, Ning X J, Ye L Y, et al. Seismic reflection analysis of high pier bridges[J].Journal of Kunming University of Science and Technology, 2001, 26(6): 86-89. (in Chinese)

- [2] 龚家逵,李聪林.高烈度软土地区铁路桥梁桩基设计及沉降控制应注意的几个问题[J].工程抗震与加固改造,2005,27(增1):129-133.
Gong J K, Li C L. Several problems in pile foundation design and settlement control of railway bridges in high intensity soft soil area [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting. 2005, 27(Sup1): 129-133. (in Chinese)
- [3] 徐略勤,李建中,吴陶晶.碰撞效应对非规则梁桥横向地震反应的影响[J].振动与冲击,2011,30(4):95-99,123.
Xu L Q, Li J Zh, Wu T J. Influence of pounding effects on transverse seismic response of a nonstandard girder bridge [J]. Journal of Vibration and Shock. 2011, 30(4):95-99,123. (in Chinese)
- [4] Hao H, Bi K, Chou N, et al. State-of-the-art review on seismic induced pounding response of bridge structures [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2013, 7(3): 1350019-1-1350019-9.
- [5] Maleki S. Effect of side retainers on seismic response of bridges with elastomeric bearings[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(1): 95-100.
- [6] 杨相展.山区高墩梁桥抗震分析[J].北方交通,2012,35(8):48-51.
Yang X Zh. Seismic analysis of high pier bridges in mountainous areas [J]. Northern Communications, 2012,35(8):48-51. (in Chinese)
- [7] 邓育林,雷凡,何雄君.地震作用下高墩桥梁横向碰撞效应研究[J].桥梁建设,2014,44(3):25-31.
Deng Y L, Lei F, He X J. Research on lateral collision effect of high pier bridge under earthquake [J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 25-31. (in Chinese)
- [8] 公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231—01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231—01—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [9] 龚万江.高墩连续T形梁桥减隔震性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
Gong W J. Study on seismic isolation performance of high-rise continuous T-beam bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [10] 范立础,聂利英,李建中.地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析[J].中国公路学报,2003,16(4):31-36.
Fan L Ch, Nie L Y, Li J Zh. Dynamic characteristic analysis of laminated rubber bearing sliding under earthquake [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4):31-36. (in Chinese)
- [11] 彭天波,李翊鸣,吴意诚.叠层天然橡胶支座抗震性能的实时混合试验研究[J].工程力学,2018,35(增1):300-306.
Peng T B, Li Y M, Wu Y Ch. Real-time hybrid experimental study on seismic behavior of laminated natural rubber bearings [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(Sup1):300-306. (in Chinese)
- [12] 姜春环.高阻尼橡胶支座力学性能及其应用研究[D].北京:北京工业大学,2016.
Jiang Ch H. Mechanical properties and application of high damping rubber bearings [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 彭亮.钢阻尼滑板支座性能及其对桥梁抗震性能的影响[D].南京:南京理工大学,2016.
Peng L. Performance of steel damped skateboard bearings and its influence on seismic performance of bridges [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] Megally S H, Silva P F, Seible F. Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments[R]. University of California, 2002.
- [15] Silva P F, Megally S H, Seible F. Seismic performance of sacrificial exterior shear keys in bridge abutments[J]. Earthquake Spectra, 2009, 25(3): 643-664.
- [16] Goel R K, Chopra A K. Role of shear keys in seismic behavior of bridges crossing fault-rupture zones [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(4): 398-408.
- [17] 徐略勤,李建中.新型滑移挡块的设计、试验及防震效果研究[J].工程力学,2016,33(2):111-118,199.
Xu L Q, Li J Zh. Study on design, test and anti-seismic effect of new sliding stops [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2):111-118,199. (in Chinese)
- [18] Bruce F M, Kazuhiko K. Dynamics of pounding when two buildings collide [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(9): 771-786.
- [19] Stavros A A, Konstantinos V S. An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(4): 289-302.
- [20] Parveen K M, Moh J H, Anthony F S. Seismic interaction at separation joints of an instrumented concrete bridge [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24(8): 1055-1067.
- [21] 叶爱君.桥梁抗震[M].北京:人民交通出版社,2011.
Ye A J. Seismic design for highway bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)