

强震区预制拼装高架桥的减隔震设计研究

郭相利

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 为研究强震区预制拼装高架桥的减隔震设计,以某快速路高架桥为工程背景,采用非线性动力时程分析的方法,分别对比研究中小跨径简支小箱梁桥采用铅芯橡胶支座和普通板式橡胶支座、大跨径连续钢箱梁桥采用拉索球钢支座和普通球钢支座时的抗震性能。结果表明:铅芯橡胶支座减隔震效果好,残余变形小,中小跨径简支小箱梁桥和组合梁桥推荐采用;拉索球钢支座可显著降低桥梁地震响应,改善下部结构受力,同时,拉索可将主梁位移限制在合理范围,防止落梁,推荐在大跨径连续钢箱梁桥中采用。

关键词: 预制拼装桥;减隔震;铅芯橡胶支座;拉索减震支座

中图分类号: U443.36

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0073-06

Research on Design of Seismic Isolation for Prefabricated Viaducts in Strong Earthquake Area

GUO Xiangli

[Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: To study the seismic isolation design of prefabricated viaducts in strong earthquake area, taking an expressway viaduct as the engineering background, the nonlinear dynamic time-history analysis method is used to compare and study the seismic performances of the small-span and medium-span simple-supported small-box girder bridges with lead rubber bearings and ordinary plate rubber bearings, and the long-span continuous steel-box girder bridge with cable ball steel bearings and ordinary ball steel bearings. The results indicate that the lead rubber bearings have the good seismic isolation effects with small residual deformation, which are recommended to use for the small-span and medium-span simple-supported small-box girder bridges, and the composite girder bridges. The cable ball steel bearings can obviously reduce the seismic responses of bridges, and the substructure stress is improved, and also the cables can restrict the displacement of the girders within a reasonable range to prevent the girder falling, which are recommended to use for the long-span continuous steel-box girder bridges.

Keywords: prefabricated bridge; seismic isolation; lead rubber bearings; cable seismic isolation bearings

0 引言

预制拼装桥梁因施工工期短、对环境影响小,近年来在城市高架桥的建设中得到了广泛应用。预制拼装桥墩节段整体性相对较差,拼装接缝处相对薄弱,目前主要集中应用在低震区^[1]。本文以某强震区预制拼装高架桥为研究对象,研究其减隔震设计,以期今后类似工程提供参考。

1 工程概况

菏泽市长江路快速通道工程位于菏泽市中心城区,连接城区东西部交通,采用“主线快速路+地面主

干路”的敷设方式,西起西安路,东至上海路,全线总长13.77 km,工程总建安费约31亿元。其中青年路至广州路段为连续高架桥,全长共6.4 km,高架段共设置8处平行下上匝道;其余路段为地面快速路的形式。主线共设置4座跨线桥,跨线桥总长约1.95 km。该工程已于2023年底全线通车运营。

桥梁采用全预制拼装结构,标准跨采用28~31 m预制混凝土简支小箱梁,桥面连续,2~4跨为1联,小箱梁桥占桥梁总面积约为84%;跨径40~50 m时采用简支钢-混凝土组合梁,占桥梁总面积约为7%;跨径55~65 m时采用变截面连续钢箱梁,占桥梁总面积约为9%。桥墩立柱和盖梁均为预制拼装结构;立柱节段之间、立柱与承台之间采用灌浆套筒连接,立柱与盖梁之间采用波纹管连接,桥墩盖梁分段预制,吊装就位后通过湿接缝连接。

收稿日期: 2024-03-29

作者简介: 郭相利(1988—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

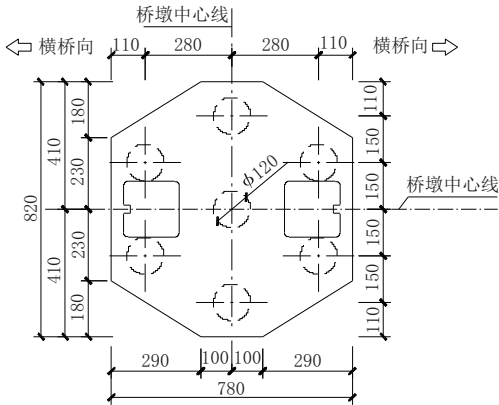


图4 小箱梁桥基础平面图(单位:cm)

3.1.2 桥梁支座

铅芯橡胶支座是一种近年来被广泛应用的减隔震支座,由橡胶层钢板和铅芯粘合而成。在正常使用状态和小震作用下,铅芯橡胶支座位移很小,这得益于其较高的初始刚度。在大震作用下,支座铅芯屈服,支座刚度明显下降,自振频率降低,可减小地震响应。铅芯增大了支座阻尼,结构通过滞回运动耗散地震能量。而且,铅芯橡胶支座的地震残余变形很小,具有很强的复位能力。

普通板式橡胶支座因结构简单、成本低廉以及安装便捷,在国内中小型桥梁结构中得到了普遍应用。然而,汶川地震的震害情况显示,当采用板式橡胶支座的梁桥遭受强震冲击时,梁底与支座顶面之间易发生相对滑动。强震作用下支座优先损伤,从而显著降低了桥梁墩柱所承受的水平地震力,对桥墩和桩基起到了有效的保护作用,实质上构成了一种减隔震机制^[5];与此同时,这也会导致较大的梁体位移,可能引发落梁破坏,而且支座发生滑动后无法提供恢复力,震后残余位移较大,修复困难。

3.1.3 有限元模型

为考虑相邻联桥梁影响,建立了3联桥有限元模型,跨径布置为12×30 m,结构分析采用有限元软件MIDAS Civil 2021(v1.1)。计算模型中,主梁、盖梁、立柱、承台均离散为空间梁单元,桩土效应采用土弹簧模拟。

小箱梁桥有限元分析模型见图5。

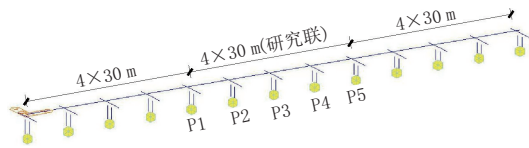


图5 小箱梁桥有限元分析模型

铅芯橡胶支座和普通板式橡胶支座在模型中采用图6所示的滞回曲线模拟。其中: K_0 为初始支座刚

度; K_f 为恢复刚度; α_1 为屈服刚度折减系数; P_1 为支座屈服承载力; D 为支座位移。

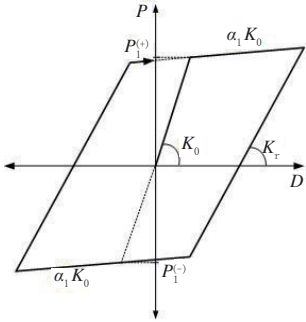


图6 铅芯橡胶支座和普通板式橡胶支座支座位学模型

铅芯橡胶支座和普通板式橡胶支座参数见表1。

表1 支座参数表

支座类型	支座型号	$K_0/$ (kN·mm ⁻¹)	$P_1/$ kN	α_1
铅芯橡胶支座	J4Q670×670×217G0.8	10.8	216	0.157
普通板式橡胶支座	GBZJ650×650×130	5.3	230	0

3.1.4 动力特性

桥梁结构1~5阶振型自振周期如表2所列。

表2 桥梁结构自振周期 单位:s

阶数	铅芯橡胶支座	普通板式橡胶支座
1	1.28	1.44
2	1.15	1.35
3	1.15	1.32
4	1.08	1.28
5	1.04	1.26

由表2可知,采用铅芯橡胶支座时,其自振周期要比采用普通板式橡胶支座时小,原因是铅芯橡胶支座具有相对更大的等效刚度。

3.1.5 支座抗震性能

经计算,E1地震作用下铅芯橡胶支座的纵横向剪力为100~130 kN,小于铅芯屈服力(216 kN),说明E1地震作用下铅芯橡胶支座处于弹性范围内。E2地震作用下铅芯橡胶支座铅芯屈服,进入非线性阶段。

以P1墩中间支座为例,铅芯橡胶支座、普通板式橡胶支座的横桥向滞回曲线见图7、图8。

比较图7、图8可知,铅芯橡胶支座横桥向所受剪力大于普通板式橡胶支座,这与二者受力特性不同有关。普通板式橡胶支座在剪力达到其剪切强度后,支座即开始滑动,无法再继续承担更大的剪力;而铅芯橡胶支座在铅芯屈服后,支座刚度明显下降,但可继续承受更大的剪力。铅芯橡胶支座最大位移

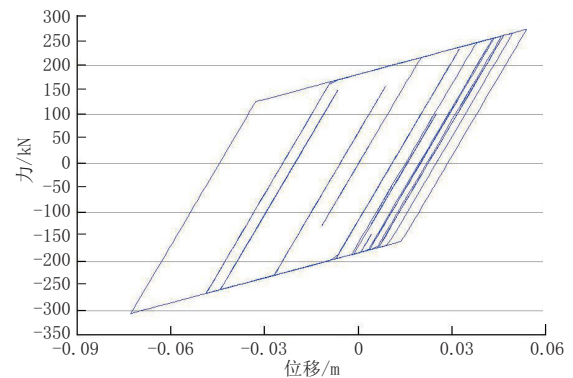


图7 E2地震作用下铅芯橡胶支座横桥向滞回曲线

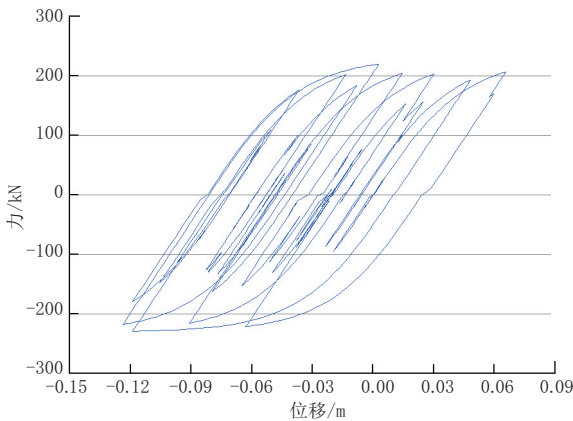


图8 E2地震下普通板式橡胶支座横桥向滞回曲线

为7.3 cm,选用支座高度为217 mm,E2地震作用下橡胶层容许剪切应变可达250%,支座变形满足规范^[3]要求。普通板式橡胶支座在达到剪切强度后其强度接近为零,E2地震作用下支座会产生滑移,且震后还有残余位移。2种支座的滞回曲线均与其力学模型相符。

2种支座在7条地震时程波作用下的平均残余位移见图9。由图9可见,铅芯橡胶支座纵横桥向的残余位移均较小,为2~3 cm,进一步说明铅芯橡胶支座具有很强的复位能力。而普通板式橡胶支座震后残余位移较大,横桥向达11 cm,并产生了支座滑移,不仅震后修复困难,还存在落梁的风险。

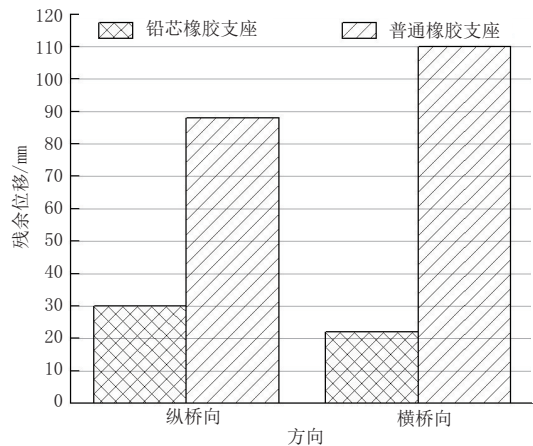


图9 E2地震作用下支座残余位移

3.1.6 桥墩抗震性能

E2地震作用下,纵桥向和横桥向墩底弯矩绝对值最大值、采用铅芯橡胶支座与采用普通板式橡胶支座时的墩底弯矩之比 λ 见表3。

表3 E2地震作用下纵横桥向墩底弯矩

方向	墩号	墩底弯矩/(kN·m)		λ
		铅芯橡胶支座	普通板式橡胶支座	
纵桥向	P1	20 946	18 229	1.15
	P2	21 963	18 714	1.17
	P3	20 734	17 715	1.17
	P4	19 811	17 078	1.16
	P5	19 404	16 597	1.17
横桥向	P1	13 570	11 672	1.16
	P2	13 523	11 620	1.16
	P3	13 470	11 533	1.17
	P4	13 177	11 298	1.17
	P5	12 988	11 197	1.16

由表3可知,采用铅芯橡胶支座时,桥墩弯矩约为采用普通板式橡胶支座时的1.15~1.17倍。这是因为通过铅芯橡胶支座传递给桥墩的剪力比普通板式橡胶支座更大,从而导致其墩底弯矩更大,这与图7、图8中支座剪力的规律相符合。总体上,2种支座均发挥了减隔震作用,地震作用下桥墩截面处于弹性状态。

3.2 连续钢箱梁抗震方案对比研究

取本工程其中1座跨线桥的1联连续钢箱梁作为研究对象,分别采用拉索减震球钢支座和普通球钢支座建立抗震分析模型,进行对比分析研究。

3.2.1 桥梁概况

连续钢箱梁桥跨径布置为45 m+65 m+45 m,下部结构中墩采用柱式墩,桥墩立柱采用1.8 m×1.8 m矩形截面,桥墩高度为5.0~6.2 m,基础采用9根直径为1.2 m的钻孔灌注桩。桥梁中墩横断面图、基础平面图见图10、图11。

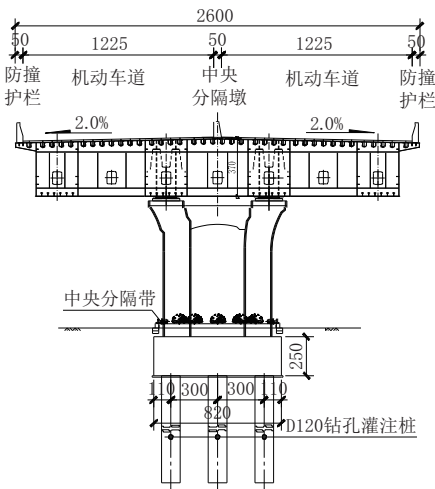


图10 连续钢箱梁桥中墩横断面图(单位:cm)

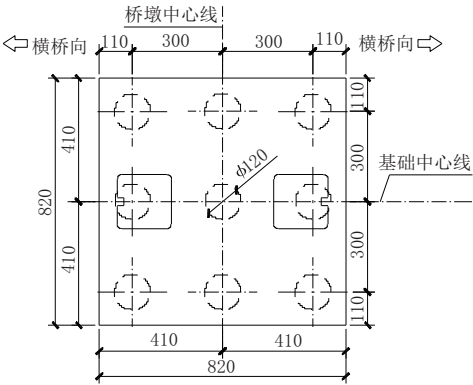


图 11 连续钢箱梁桥基础平面图 (单位: cm)

3.2.2 桥梁支座与有限元模型

拉索减震球钢支座是近年来被广泛应用的减隔震支座,其为拉索和普通球钢支座的结合体。在正常使用荷载和小震作用下与普通球钢支座相同,能够有效传递结构荷载并应对水平力的需求;在中大地震作用下,固定支座剪力销会剪断,转变为活动支座来隔离结构,并由拉索限制过大位移,同时利用摩擦来耗散地震能量^[6]。

拉索减震球钢支座恢复力模型见图 12。其中: K_1 为屈服前刚度; F_s 为支座摩擦力; K_s 为拉索刚度; u_0 为拉索的自由程。

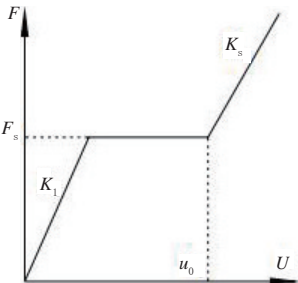


图 12 拉索减震球钢支座恢复力模型

拉索减震球钢支座的主要规格参数见表 4。

表 4 拉索减震球钢支座参数表

支座位置	支座型号	剪力销剪断力/kN	拉索水平刚度/(kN·mm ⁻¹)	拉索自由行程/mm
边墩	LSQZ 4000	400	57	150
中墩	LSQZ 25000	2 500	127	150

该跨线桥跨径布置为 6×30 m+45 m+65 m+45 m+6×30 m。为考虑与研究联相邻联桥梁的影响,完整建立了该座跨线桥的计算模型,如图 13 所示。研究联的相邻联为预制混凝土简支小箱梁结构,采用铅芯橡胶支座。

为了进行对比研究,选用普通球钢支座进行同步分析,固定支座设置于 P2 墩。

3.2.3 支座抗震性能

E1 地震作用下,拉索减震球钢支座剪力均小于

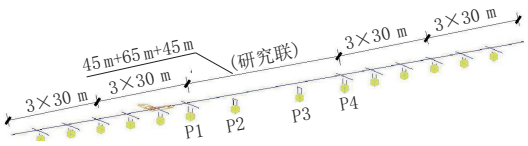


图 13 连续钢箱梁桥有限元分析模型

其剪力销剪断力,支座位移很小,其受力性能与普通球钢支座相同。

E2 地震作用下,中墩支座最大剪力为 9 332 kN,边墩支座最大剪力为 3 787 kN,均大于拉索减震球钢支座剪力销的剪断力,且大于普通球钢支座的最大水平承载力,充分说明了采用减隔震支座的必要性。在其中 1 条人工地震波作用下,中墩拉索减震球钢支座纵桥向滞回曲线如图 14 所示(图中未示出拉索受力情况)。

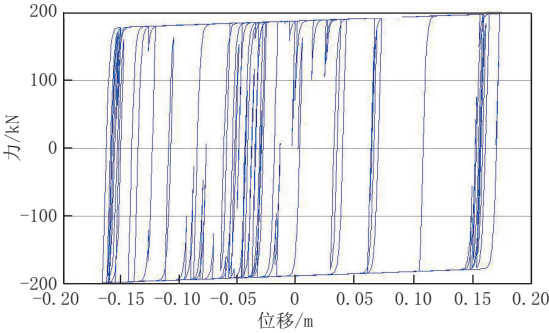


图 14 E2 地震作用下中墩拉索减震球钢支座纵桥向滞回曲线 (不含拉索)

由图 14 可知,拉索减震球钢支座滞回曲线与其力学模型相吻合,支座最大剪力与支座最大摩擦力相符;支座最大位移为 172 mm。由于支座位移大于拉索自由行程(150 mm),因此拉索开始张紧受力,所得到的支座拉索纵桥向滞回曲线见图 15。

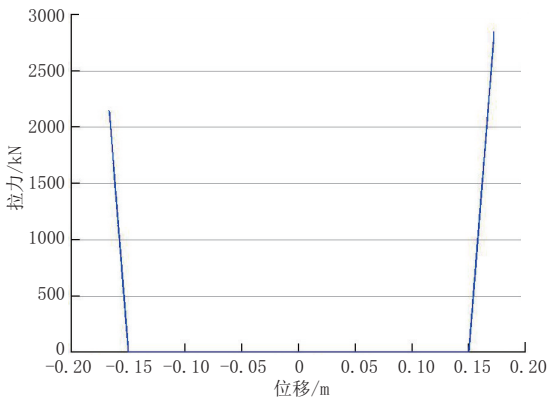


图 15 E2 地震作用下中墩拉索减震球钢支座拉索纵桥向滞回曲线

由图 15 可见,拉索最大张力为 2 848 kN,大于支座剪力销剪断力且小于拉索极限最大承载力(10 000 kN),说明拉索减震球钢支座可有效约束主梁位移,避免落梁的发生。

在相同人工地震波作用下,采用普通球钢支座

时P4墩处纵桥向墩梁相对位移曲线见图16。

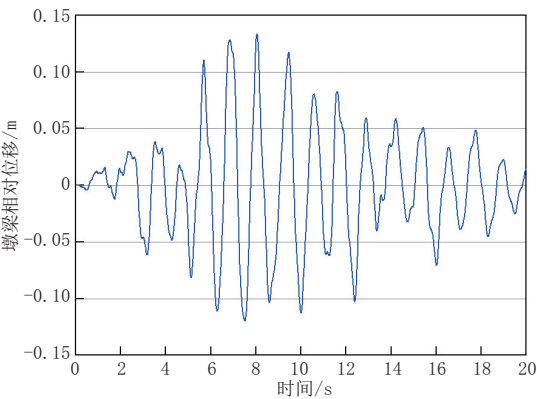


图16 E2地震作用下采用普通球钢支座时P4墩处纵桥向墩梁相对位移曲线

采用普通球钢支座时,纵桥向墩梁相对位移主要受固定墩P2变形控制,而P2墩立柱高度较小,水平刚度较大,由图16可得到,此时P4墩处纵桥向最大墩梁相对位移为134 mm,略小于采用拉索支座时的支座变形。

3.2.4 桥墩抗震性能

为定量分析拉索支座的减震效果,引入减震率 η 的概念。 η 为采用拉索球钢支座时的地震响应相较于采用普通球钢支座时地震响应的减少百分比。E2地震作用下墩底纵桥向弯矩和减震率见表5。

表5 E2地震作用下墩底纵桥向弯矩和减震率

位置	墩底弯矩/(kN·m)		减震率 η /%
	拉索减震球钢支座	普通球钢支座	
P1	15 071	11 291	74
P2	13 603	52 332	
P3	13 924	3 979	
P4	14 170	11 764	

由表5可见:采用普通球钢支座时,因P2墩采用固定支座,纵桥向水平地震力主要由其承担,故P2墩墩底弯矩较大,并显著大于其他桥墩;P1、P4和P3墩纵桥向均为滑动支座,但P1和P4墩小箱梁侧采用铅芯橡胶支座,相较P3墩需承受更大的支座剪力,故P1、P4墩底纵桥向弯矩比P3墩大。

采用拉索减震球钢支座时,E2地震作用下固定支座剪力销被剪断,此时所有拉索支座均为滑动支座,通过拉索限制主梁位移,使地震响应明显降低。由于4个桥墩共同承受纵向地震力,因此其墩底弯矩差别不大,桥墩受力更为合理。其中的P2墩相较采用普通球钢支座时(为固定墩),其墩底纵桥向弯矩降低显著,减震率为74%;其余3个桥墩墩底纵桥

向弯矩则有着不同程度的增加。
E2地震作用下4个桥墩墩底横桥向弯矩见表6。

表6 E2地震作用下墩底横桥向弯矩

位置	墩底弯矩/(kN·m)		减震率 η /%
	拉索减震球钢支座	普通球钢支座	
P1	8 412	10 371	19
P2	11 489	23 487	51
P3	11 529	23 861	52
P4	8 289	10 532	21

E2地震作用下,拉索固定支座剪力销被剪断,转变为滑动支座,延长了桥梁自振周期,使地震响应显著降低。由表6可见,与采用普通球钢支座时相比,采用拉索减震球钢支座时的墩底横桥向弯矩减震率为19%~52%。

4 结 语

(1)普通板式橡胶支座相比铅芯橡胶支座具有更小的刚度,可以延长桥梁自振周期,降低地震响应,是一种简单有效、经济性好的减隔震支座;但其震后残余变形大,修复困难,如果使用,应保证其滑动空间,并采取切实有效的措施防止因位移过大而落梁。铅芯橡胶支座具有一定的屈服后刚度,自复位能力强,震后残余变形小,具有较好的减隔震效果,其综合性能更好,简支小箱梁桥和简支组合梁桥推荐采用。

(2)拉索减震球钢支座在正常使用和小震作用下,能够有效传递结构荷载并适应结构变形需求,其性能与普通球钢支座相同;在中大震作用下,支座剪力销被剪断,固定支座转变为滑动支座,使地震响应明显降低,同时,支座的拉索可将主梁位移限制在合理范围内,防止落梁。拉索减震球钢支座承载能力大,减隔震效果好,连续钢箱梁桥推荐采用。

参考文献:

[1] 袁万城,钟海强,党新志,等.装配式桥墩连接形式抗震性能研究进展[J].东南大学学报(自然科学版),2022,53(3):609-622.

[2] GB 18306—2015,中国地震动参数区划图[S].

[3] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].

[4] 徐俊,王明晔,卢永成.高震区城市高架桥梁的全预制拼装设计方案[J].城市道桥与防洪,2017(12):52-55;77.

[5] 王克海,孙永红,韦韩,等.汶川地震后对我国结构工程抗震的几点思考[J].公路交通科技,2008,25(11):54-59.

[6] 袁万城,王斌斌.拉索减震支座的抗震性能分析[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(8):1126-1131.