

支座类型对重载铁路简支梁动力响应影响研究*

陈树礼^{1,2}, 许宏伟^{1,2}, 刘永前^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制研究所 石家庄, 050043)

(2. 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室 石家庄, 050043)

摘要 为研究板式橡胶支座(简称板座)和球型支座(简称球座)在重载铁路桥梁中的适用性和差异性,以某重载铁路 3 座桥梁作为研究对象,采用现场试验方法,对比研究板座和球座对重载铁路桥梁结构振动、冲击和变形的影响规律。研究表明:板座具有较大的弹性和抗剪切变形能力,而球座则具有更大的刚度、转动性能、耐久性和显著降低的横竖向位移变形等特点;相对于板座,球座应用引起列车对支座和桥梁结构更大的冲击作用,进而引起支座响应频率、桥跨动挠度和阻尼比增大,但球座的应用也引起桥跨结构横向动力响应显著降低,有利于行车安全,并且对桥墩振动、桥跨竖向振动和桥跨自振性能的影响较小。因此,球座给桥梁结构提供了更好的稳定性和可靠性。

关键词 重载铁路;板式橡胶支座;球型支座;动力响应;对比分析

中图分类号 TB123; TH82

引言

支座是桥梁结构中承上启下的重要组成部分,主要起到承重、约束和适应变形等重要功能,类型多样。其中,板座是我国铁路中一种最常见类型^[1-2],具有构造简单、安装方便、造价便宜和易于更换等优点,并具有良好的吸能减振能力。随着使用年限增加和重载运输的快速发展,板座出现了橡胶老化、脱空、鼓凸变形和横向位移过大等一系列病害,支座性能发生退化,进而导致桥梁结构的承载能力和使用性能降低。对于此类支座严重病害,常规的维修加固措施无法彻底根治,目前多采用将其更换为球座的方法来进行处理,而板座和球座的材料性能、构造特点、刚度大小、约束形式和受力特点均有所不同,不同支座条件下的桥梁受力也有所区别,并且重载运输的快速发展也对支座性能提出了更高的要求。因此,开展支座类型对重载铁路桥梁动力响应影响研究很有必要。

近年来,国内外学者围绕支座及其应用以及对桥梁结构动力响应问题进行了广泛研究。王凯睿等^[3]采用模型振动台试验方法,开展了板式支座与铅芯支座连续梁桥试验对比分析和考虑支座滑移效应试验。Wei等^[4]对双曲面球型支座在高速铁路连续梁桥的应用进行了系统研究。陈万祥等^[5]采用理论分析方法,

研究了粘弹性支座 RC 梁在低速冲击下的动力响应,认为支座条件会引起桥梁动力响应发生一定程度的变化。文献[6-8]进行了考虑板座滑移的振动台试验和摩擦性能试验。文献[9-10]采用模型试验方法对弹性支座刚度变化引起的简支箱梁桥振动特性进行了深入研究。邱惠清等^[11]研究了岸桥前大梁支座对横向振动的影响规律。朱志辉等^[12]基于车桥耦合分析和现场试验手段,研究了车速和轨道不平顺对桥梁冲击的影响规律。Steelman等^[13]研究了地震作用下的板式橡胶支座滑移机制及影响问题。

随着重载运输快速发展,板座越来越不能适应大轴重、大运量的运输要求,将板座更换为球座是未来重载运输的发展方向。因此,笔者以某重载铁路桥梁支座更换施工为背景,采用现场试验方法,深入研究支座类型对桥梁动力性能的影响规律,以期为后续大批量的重载铁路支座更换提供一些参考数据。

1 现场试验

1.1 桥梁概况

某重载铁路是我国的一条重要运输通道,年运量超过 3 亿 t,常规通行 23 t 及 25 t 轴重的为 1 万 t 和 2 万 t 编组列车,桥跨结构多为 20, 24 和 32 m 跨度简

* 国家重点研发计划重点专项资助项目(2016YFB1200401-107);国家自然科学基金面上资助项目(51678376);河北省重点研发计划资助项目(20375410D)

收稿日期:2020-01-08;修回日期:2020-05-29

支 T 梁,多用板座和盆式橡胶支座。随着运量和轴重的不断增加,板座出现了劣化开裂、脱空、局部承压、鼓包外凸及钢板锈蚀等系列病害,支座承担的传递荷载及适应变形的能力逐渐减弱甚至丧失,直接影响了桥梁结构受力和运营安全。鉴于球座具有传力可靠、转动灵活、位移量大和耐久性好等优点,在不损失桥梁结构和不改变受力状态情况下,已经逐步将板座更换为球座,以改进支座功能,确保运营安全。

板座一般由多层橡胶和多层薄钢板经高温硫化叠合、粘合压制在一起,多用于铁路 20 m 以下跨度梁。球座主要由上座板、下座板、球冠衬板及滑板等构件组成,传力可靠,小巧轻便,能够承受更大的竖向荷载且各向转动性能一致。通常情况下,板座多直接放置在墩台垫石上,主梁直接落在支座之上,支座与垫石和主梁之间无连接,横向多采用限位装置进行位移限制。球座一般采用螺栓将上下座板与梁体和墩台垫石连接在一起,不需单独设置限位装置。

为研究支座类型对桥梁结构动力性能的影响规律,选择 3 座桥梁进行支座更换前后的动力性能试验,分别为 1#,2#和 3#桥。每座桥梁均选择第 1 孔桥跨和 1#桥墩进行试验,共计 3 孔主梁和 3 个桥墩,其中桥跨主梁均为 20 m 低高度预应力钢筋混凝土 T 梁,双片并置,采用横隔板进行横向连接。1#和 2#桥采用矩形板式桥墩,墩高为 7.80 m,墩宽为 3.20 m;3#桥采用圆柱形桥墩,墩高为 6.83 m,直径为 2.20 m;3 个桥墩均采用桩基础。3 座桥梁均为直线布置,1#桥设置有 3.7‰ 的纵坡,2#和 3#桥均为平坡。桥梁概况如表 1 所示。

表 1 桥梁概况
Tab.1 Bridge profile

桥梁编号	桥墩类型	梁型	跨度/m
1#	矩形板式	T 梁	20.0
2#	矩形板式	T 梁	20.0
3#	圆柱形	T 梁	20.0

1.2 试验设备及工况

在主梁跨中挡砟墙上布置 4 个拾振器,测试列车通过时的桥梁结构横向振幅、竖向振幅、横向加速度及竖向加速度;在主梁跨中布置 2 个应变式位移计,测试桥梁跨中动挠度及动力系数;在活动支座处布置 4 个位移计,测试列车作用下的支座竖向位移

和横向位移变化情况;在桥墩墩顶布置 2 个拾振器,测试桥墩墩顶横向振幅和纵向振幅。测点布置如图 1 所示。

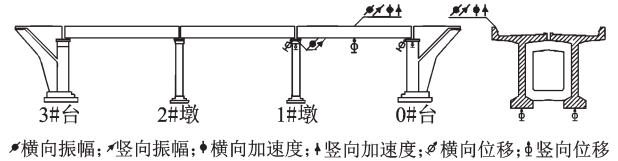


图 1 测点布置

Fig.1 Layout of measuring points

振幅及加速度测试选用中国地震局 891- II 型拾振器,配套放大器;主梁动挠度和支座位移测试分别选择日本 SDP-50 和 CDP-10 位移计,测试精度为 0.01 和 0.001 mm;数据采集、分析和处理采用德国 IMC 系列数据采集和处理系统。现场试验工作记录如图 2 所示。

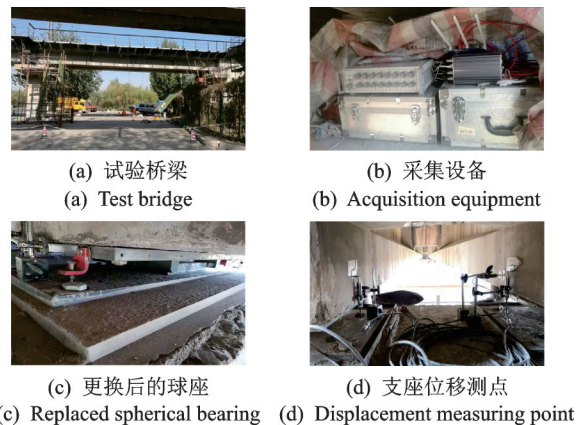


图 2 现场试验记录
Fig.2 Field test record

现场测试采用正常运营列车作为试验列车,均为满载重车,机车包括 SS8 型和 HXN3 型,车辆主要为 C80 敞车,列车速度分为 65,70 和 75 km/h 这 3 个级别,每种速度保证 50 趟以上有效数据。现场测试完成后,对所有测试参数时程曲线检查并进行幅值统计、失真数据剔除和频谱分析,再完成数据整理分析。其中,最大值为所有列车作用下的各测试参数最大值,平均值为所有测试数据最大值的算术平均值。

2 桥墩动力响应分析

桥墩是支撑上部结构的重要构件,而桥墩与主梁之间通过支座相连,列车荷载作用于主梁时,力经由轨道、枕木、主梁和支座依次传递到墩

身上,使得桥墩发生横向和纵向变形,通过测试墩顶振幅变化情况,能够在一定程度上反映墩身承受的荷载大小。表2为采用2种类型支座的桥墩振动测试结果对比,图3为墩顶振幅最大值统计。

表2 桥墩振动测试结果对比

Tab.2 Comparison of vibration test result of bridge pier

桥号	方向	最大值/mm		增减/ %	平均值/mm		增 减/%
		板座	球座		板座	球座	
1#	横向	0.293	0.224	-23.6	0.232	0.185	-20.1
	纵向	0.238	0.302	26.8	0.179	0.247	37.5
2#	横向	0.412	0.362	-12.3	0.305	0.290	-4.8
	纵向	0.201	0.151	-24.9	0.167	0.122	-27.0
3#	横向	0.331	0.374	13.1	0.269	0.325	20.6
	纵向	0.129	0.099	-23.0	0.104	0.085	-18.2

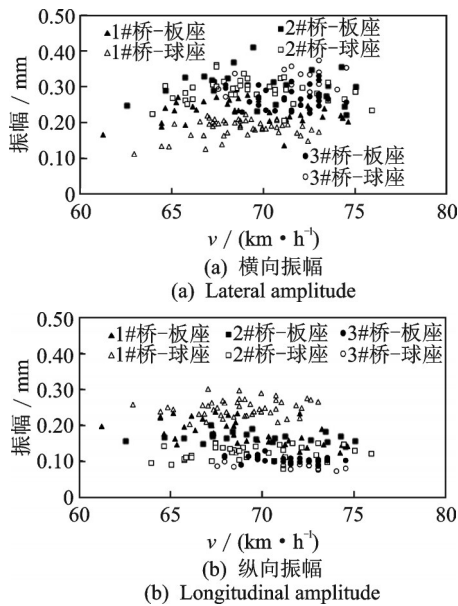


图3 墩顶振幅最大值统计

Fig.3 Statistical of maximum amplitude of pier top

由表2和图3可知:对比分析墩顶横向振幅,将板座更换为球座后,1#和2#桥墩顶横向振幅略有减小,最大值和平均值均体现了这一规律;而3#桥墩顶横向振幅则略有增大。板座和球座与桥梁结构的连接方式不同,导致列车通过向下传递的横向荷载也有差异,球座的应用使得墩身和主梁之间的连接大大增强,传递的荷载有所增大,但由于其适应变形的能力相对也较强,进而导致1#和2#桥墩顶横向振幅略有降低,球座对一般类型桥墩具有一定的横向减振效果。对于刚度较弱的桥墩而言,球

座的应用同时可能会导致传递到桥墩的横向力增大,进而引起桥墩横向振动加剧,3#桥墩顶横向振幅在更换球座后有所增大,也验证了这一现象。因此,在进行日常管养和改造加固时应给予重点关注。

对比分析墩顶纵向振幅,将板座更换为球座后,2#和3#桥墩顶纵向振幅有所降低;而1#桥墩顶纵向振幅略有增大,并且不论采用何种类型支座,1#桥墩顶纵向振幅均大于2#和3#桥数据。由于3孔桥梁支座类型及1#,2#桥桥墩类型和尺寸完全一致,区别就在于1#桥位于3.7‰的坡道上,而2#和3#桥位于平道上,因此可以认为线路纵坡是引起桥墩纵向振动加大的主要原因,而球座良好的转动性能则对桥墩纵向有一定的抑振作用。

对比桥墩墩顶横纵向振幅,2种支座条件下,2#和3#桥桥墩横向振动均大于纵向振动;但对于1#桥桥墩而言,板座条件下墩顶横向振幅大于纵向振幅,而球座条件下则表现为墩顶横向振幅小于纵向振幅,且纵向振动较板座时也有所增大。结合3座桥梁结构类型和坡道情况,可以认为纵坡存在是桥墩纵向振动的主要原因,在日常维护时需多注意长大坡道桥梁墩台基础受力和病害问题。

对比2种类型支座,板座具有更好的弹性,而球座刚度较大且弹性较小。当桥梁结构采用板座时,自上而下传递的荷载一部分由板座承担,列车经过时板座会产生明显的不均匀压缩变形,而球座则通过转动来实现减振减载作用。对桥墩时程曲线进行自谱分析,列车作用下,采用板座的桥墩振动频率介于2.12~3.77 Hz之间,更换为球座后桥墩振动频率略有增加,介于2.42~4.13 Hz之间,且板式桥墩振动频率大于圆柱形桥墩,可见球座在增加了约束能力的同时也引起桥墩振动频率加大。

3 支座动力响应分析

活载作用下支座结构不可避免地会产生变形。板座由橡胶和钢板共同组成,在竖向具有足够的刚度和较大的压缩变形,在水平方向也具有一定的弹性;而球座则由多种钢构件组合而成,承载力较板座大,且具有位移大、转动扭矩小和各向转动性能一致的特点。《铁路桥梁检定规范》^[14]中对橡胶支座的横向位移进行了规定,运营列车作用下横向位移限值不能超过2.00 mm,而竖向位移代表了竖向刚度,板式支座未明确限值大小,球座则无限值要求。列车作用下支座位移统计表和最大值统计分别如表3和

图4所示。

表3 支座位移统计表

Tab.3 Statistical table of bearing movement

桥号	方向	最大值/mm		增减/ %	平均值/mm		增减/ %
		板座	球座		板座	球座	
1#	横向	0.346	0.063	-81.8	0.236	0.045	-80.9
	竖向	0.292	0.151	-48.2	0.243	0.128	-47.5
2#	横向	0.212	0.083	-60.7	0.179	0.065	-63.7
	竖向	0.211	0.109	-48.3	0.199	0.095	-52.3
3#	横向	0.485	0.089	-81.7	0.350	0.076	-78.3
	竖向	0.284	0.136	-52.2	0.254	0.121	-52.6

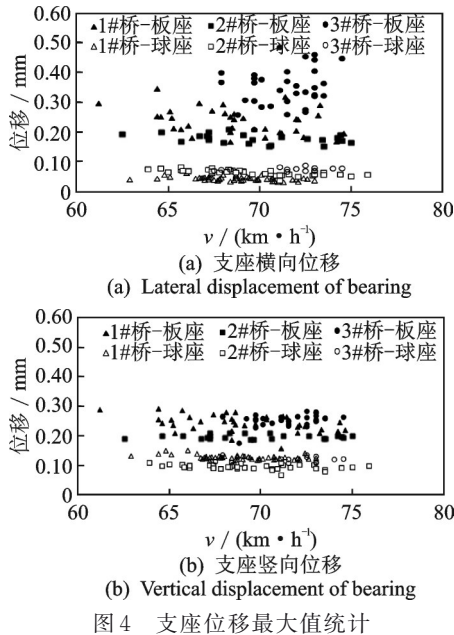


图4 支座位移最大值统计

Fig.4 Statistical of bearing displacement maximum value

由表3和图4可知,列车作用下板座和球座均产生一定程度的横向位移和竖向位移变化。其中,板座横向位移是球座的3~6倍,竖向位移约为球座的2倍左右;而球座两个方向位移均大幅减小,说明球座的竖向刚度和横向约束能力较板座大大提高。

3孔桥梁板座横向位移最大值介于0.212~0.485 mm之间,数值相对较大且比较离散;而球座横向位移最大值介于0.063~0.089 mm之间,数值较小且比较接近。可以认为,更换为球座后,支座位移得到明显降低。在试验过程中对2种类型支座的变形进行了观测,板座上表面和梁底之间未发生滑移,板座横向位移主要表现为橡胶的不均匀压缩变形,引起梁体左右摆动,而球座上表面与

梁底间也未发生滑移,球座横向位移表现为球铰的转动。

对比分析2种支座竖向位移数据,实测板座竖向位移最大值介于0.211~0.292 mm之间,数据比较集中且最大值与平均值比较接近。更换为球座后,支座位移明显减小,其最大值介于0.109~0.151 mm,降低幅度均达到50%左右。

对比支座位移数值大小,板座横向位移与竖向位移比较接近,数值较大且基本都超过了0.20 mm;而球座的横向位移均小于竖向位移。板座是通过橡胶的不均匀压缩实现转角和减振,列车作用产生的较大变形均由支座承担。球座的横向位移变化由球铰转动引起,而竖向变形由球座各部件和空隙引起,球座具有更好的横向稳定性。图5和图6分别为典型支座位移时程曲线图。

可以看出,列车作用下板座和球座的横向及竖向位移均为弹性变化,且基本没有残余位移。板座横向位移整体表现为在基准点位置处的左右振动,幅值远远大于球座;而球座横向位移整体表现为先发生一个初始变位,然后在初始变位左右高频振荡。板座和球座横向位移振动频率分别介于1.43~4.23 Hz和1.56~4.49 Hz之间,二者基本相等。

板座和球座竖向位移整体表现基本一致,列车作用下均是先产生一个向下的初始变位,然后在初始变位上下振荡。相比较而言,板座竖向振动频率介于1.58~4.52 Hz之间,小于球座竖向振动频率

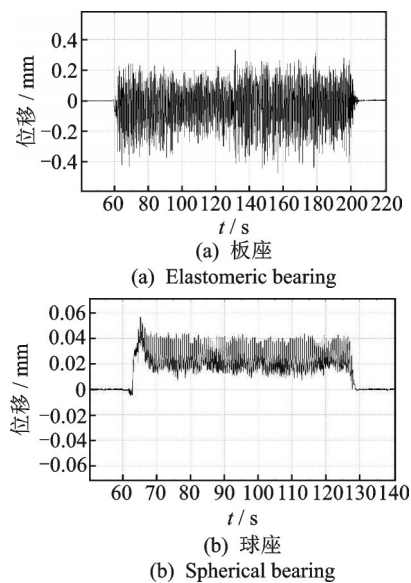


图5 典型支座位移时程曲线

Fig.5 Time history curve of lateral displacement of typical bearing

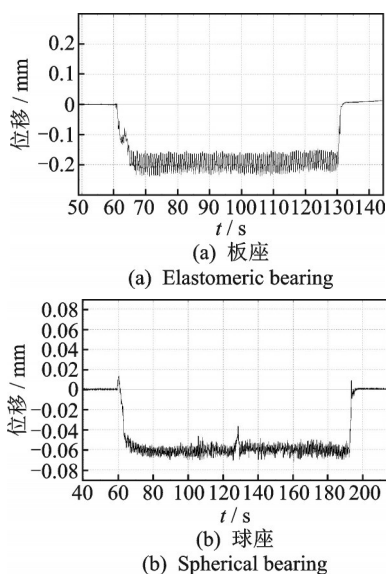


图6 典型支座竖向位移时程曲线

Fig.6 Time history curve of vertical displacement of typical bearing

1.69~5.47 Hz,列车作用下引起球座产生了较高频率的振动,而板座引起较大的竖向振动幅值变化。可以认为:同一列车作用下,板座具有较大的位移变化数值和较低的振动频率,而球座位移数值较小但振动频率略高;板座具有良好的减振隔振性能,而球座则承受更大的冲击作用。

4 桥跨结构动力响应分析

列车作用下桥跨结构的动力响应是影响列车安全运营的重要影响因素,也是评判结构性能的重要指标。支座类型不同,支撑刚度和约束条件也有所区别,移动荷载作用下的桥梁结构动力响应也会发生变化。桥跨动力响应分析从横向振动、竖向振动、动挠度、频率和阻尼比等几方面展开。

4.1 横向振动

桥跨跨中横向振幅和横向加速度是影响桥梁行车安全的两个关键动力性能指标,由列车荷载激励引起,但也受到结构类型和约束情况的影响,其数值大小直接反映了梁体横向刚度和约束变化。表4为桥梁结构横向振动数据对比,图7为桥跨横向振动统计。

由表4和图7可以看出:球座代替板座后,桥跨结构的横向振幅和横向加速度均有一定程度的降低,其中桥梁横向振幅降低幅度较大,降幅在-4.9%~-47.3%之间且比较离散;而横向加速度降低幅度较小,降幅介于-7.9%~-25.5%之

表4 横向振动数据对比
Tab.4 Comparisons of lateral vibration data

参数	类型	振幅/mm			$a/(m \cdot s^{-2})$		
		1#	2#	3#	1#	2#	3#
最大	板座	0.472	0.699	0.976	0.262	0.171	0.315
	球座	0.388	0.384	0.680	0.241	0.128	0.272
	值	增减/%	-17.8	-45.2	-30.3	-7.9	-25.5
平均	板座	0.322	0.567	0.628	0.189	0.113	0.224
	球座	0.306	0.299	0.510	0.162	0.086	0.208
	值	增减/%	-4.9	-47.3	-18.8	-14.3	-24.6

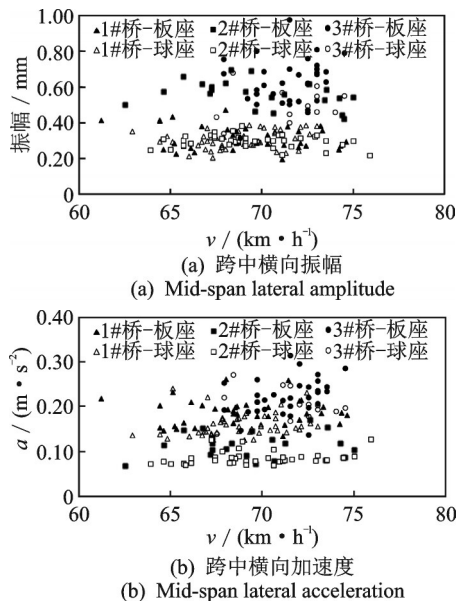


图7 桥跨横向振动统计

Fig.7 Lateral vibration statistics of bridge span

间。可以认为,球座改变了对主梁的约束状态,其约束能力大大增强,对桥跨的横向减振效果比较明显,尤其是横向振幅,而加速度的大小与轮轨冲击关系更大,支座约束对其影响略小。

对比3孔桥跨横向振幅数据,1#和2#这2孔桥梁主梁和墩身类型均一致,但采用板座时测试数据有较大差异。采用板座时,1#和2#桥支座横向位移最大值分别为0.346和0.212 mm,对应墩顶横向振幅最大值分别为0.293和0.412 mm,而1#和2#桥跨中横向振幅最大值分别为0.472和0.699 mm,差异较为明显。3#桥跨中振幅远远大于1#和2#桥数据,而现场观测未发现3孔梁体存在明显病害。支座位移和墩身振动会对桥跨结构横向振动产生一定影响,但不是最主要因素,横向振动是与桥跨结构状态关系最为密切。当采用球座替换板座后,1#和2#桥横向振幅数据基本相等且显著降低,3#桥桥跨横向振动也明显降低。这

表明球座大大增强了主梁的稳定性并减小了梁体振动幅度,球座对降低桥跨结构横向振动有明显效果。

加速度是表征单位时间内速度改变程度的矢量,文献[12]中规定桥跨结构横向振动加速度不应超过 1.40 m/s^2 ,实测 3 孔桥跨横向加速度均远远小于这一标准。采用球座替代板座后,桥跨横向加速度均略有下降,但降低幅度不大。加速度主要和车辆蛇形运动冲击有关,虽然球座改变了墩身与主梁的约束状态,但约束面积、桥梁恒载以及其他基本条件没有发生变化,因此将板座更换为球座后对桥跨横向加速度的影响较小。

对 3 孔桥跨进行频谱分析,采用板座的 1#,2# 和 3# 桥跨桥跨横向自振频率分别为 4.53, 4.62 和 4.72 Hz,更换为球座后 3 孔桥跨横向自振频率分别为 4.55, 4.68 和 4.76 Hz,支座更换前后桥跨结构自振频率基本无变化。自振频率是桥跨结构自身固有的振动频率,在约束未发生明显变化情况下,桥跨结构自振频率将不会发生改变。

4.2 竖向振动

竖向振动在一定程度上反映了桥跨竖向刚度,表 5 为桥跨结构跨中位置竖向振动数据对比,图 8 为桥跨竖向振动统计。

由表 5 和图 8 可以看出:球座替代板座后,桥跨结构的竖向振幅和竖向加速度变化规律不明显,数据变化较小,远小于桥跨横向振幅减小幅度;更换球座后梁体竖向振动较采用板座时更为稳定,不同桥跨的竖向振幅离散型更小。因此,球座在一定程度上提高了支撑稳定性和一致性,不同列车通过引起的桥跨竖向振动差异性较小,而板座的性能差异较大。

对支座上方梁端位置处竖向振动也进行了测试,采用球座替代板座后,梁端竖向振幅数值有所降

表 5 竖向振动数据对比

Tab.5 Comparisons of vertical vibration data

参数	类型	振幅/mm			$a/(m \cdot s^{-2})$		
		1#	2#	3#	1#	2#	3#
最大	板座	0.761	0.551	0.752	1.080	1.213	1.224
	球座	0.683	0.611	0.672	1.127	1.131	1.028
值	增减/%	-10.3	10.9	-10.6	4.4	-6.8	-16.0
平均	板座	0.500	0.473	0.657	0.659	0.963	0.771
	球座	0.462	0.532	0.565	0.663	0.825	0.919
值	增减/%	-7.6	12.3	-14.0	0.6	-14.3	19.1

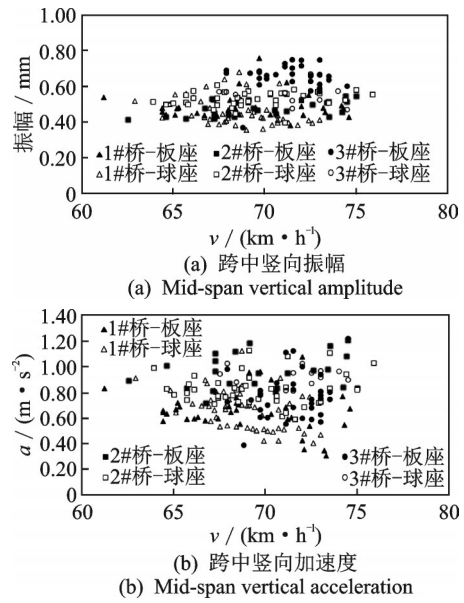


图 8 桥跨竖向振动统计

Fig.8 Vertical vibration statistics of bridge span

低,振动幅值最大值由 $0.20 \sim 0.22 \text{ mm}$ 降至 $0.08 \sim 0.11 \text{ mm}$,与支座竖向振动降低幅度大体相当;而竖向振动加速度数值有所增加,由 $0.70 \sim 1.12 \text{ m/s}^2$ 增至 $1.02 \sim 1.45 \text{ m/s}^2$ 。球座刚度增加和弹性降低引起梁端竖向冲击增大,在增大冲击加速度的同时降低了振动幅度。

4.3 动挠度

跨中挠度是反映桥梁竖向刚度的最主要指标,表 6 和图 9 分别为跨中动挠度数据对比和桥跨动挠度幅值统计,其中挠度数值扣除了支座竖向沉降的影响。

由表 6 和图 9 可知,去除支座沉降的影响,球座替代板座后,桥跨结构跨中动挠度有所增加,最大值和平均值都体现了这一规律。对应的 3 孔桥梁动挠度动力系数也由 $1.04 \sim 1.06$ 增加至 $1.08 \sim 1.12$ 。桥

表 6 跨中动挠度数据对比

Tab.6 Comparison of mid-span dynamic deflection data

参数	类型	动挠度/mm		
		1#	2#	3#
最大值	板座	7.190	8.193	6.733
	球座	7.415	8.394	7.066
值	增减/%	3.10	2.50	4.90
平均值	板座	6.671	7.643	6.306
	球座	6.967	7.782	6.633
值	增减/%	4.40	1.80	5.20

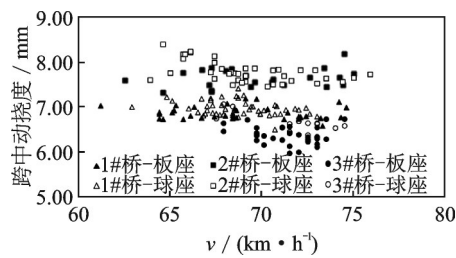


图9 桥跨动挠度幅值统计

Fig.9 Dynamic deflection amplitude statistics of bridge span

上轨道、道砟及列车类型均未发生改变,仅支座类型发生了改变,可以认为支座类型的改变是引起动挠度增大的直接原因,支座刚度的增加引起列车对桥梁跨中的冲击加剧,进而引起桥跨结构挠度有所增大。

对比3孔桥跨动挠度数据,2#桥动挠度明显大于其余2孔桥梁。现场观测发现,2#桥梁体底部有裂缝出现,混凝土外观表现也略差,而1#和3#桥未发现混凝土开裂情况且状况较好。可以认为桥跨结构状态是导致动挠度有所差异的根本原因,而支座约束状态和刚度的改变会对挠度产生影响,引起桥跨结构动挠度数值和相应冲击系数发生变化。

4.4 阻尼比

阻尼比是阻尼与临界阻尼的比值,代表桥梁结构在受激振后振动的衰减形式,文献[12]规定阻尼比是有阻尼自由振动波形对数衰减率的 $1/2\pi$ 。阻尼比的影响因素主要包括材料阻尼、周围介质阻尼和约束阻尼等,由于结构形式不变,支座类型改变仅造成了约束阻尼改变,进而引起梁体阻尼比变化。现场试验时采用自由衰减振动法和脉动法进行阻尼比测试与分析。表7为阻尼比统计表。

表7 桥跨结构振动阻尼比

Tab.7 Damping ratio of bridge span structure %				
方向	桥号	板座	球座	增减
横向	1#	3.364	4.334	28.8
	2#	3.424	4.162	21.6
	3#	2.962	3.642	23.0
竖向	1#	3.855	4.423	14.7
	2#	3.937	4.591	16.6
	3#	2.679	3.129	16.8

由表7可知:采用板座时桥跨结构横向振动阻尼比介于2.96%~3.42%之间,竖向振动阻尼比介于2.68%~3.94%之间,二者大体相当,但竖向振动

阻尼比离散性更大;当采用球座替代板座后,桥跨结构横向和竖向振动阻尼比均有所增大,且3孔桥跨结构阻尼比增加幅度也大体相当。

分析列车出桥后的桥跨结构自由衰减振动波形,桥跨结构横向振动频率和竖向振动频率均有所增加,但增加幅度较小,说明球座较板座刚度有所增加,耗散外部能量的能力略微有所增大,桥跨结构振动衰减速度加快。

5 结论

1) 板座和球座都是适用于重载铁路桥梁的支座类型,板座具有弹性好、剪切变形能力大的特点,而球座传力可靠、耐久性好,采用2种类型支座的桥梁结构动力性能均满足相关规范要求。

2) 球座替代板座后,列车对桥梁结构的冲击有所增大,表现在支座响应频率增加、桥跨动挠度和阻尼比增大等方面,但支座横向和竖向位移显著减小,桥跨结构横向动力响应大幅降低,而对桥墩振动和桥跨竖向振动影响则不太明显。总体来说,球座较板座给桥梁结构提供了更好的稳定性和可靠性。

3) “货运重载”是我国铁路继“客运高速”后的又一重点发展方向,而现有铁路的重载化扩能改造对支座性能提出了更高的要求,相比较而言,传力更好、转动更灵活的球座更适用于重载铁路,具有广阔的推广应用前景。

参 考 文 献

- [1] 胡兆同,陈万春. 桥梁通用构造及简支梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,2001:130-138.
- [2] 陈树礼,刘永前,张彦兵. 支座病害对大跨度钢桁梁桥的振动影响研究[J]. 振动与冲击,2017,36(13):195-200.
CHEN Shuli, LIU Yongqian, ZHANG Yanbing. Vibration influence of large span steel truss bridge accused by bearing damage[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13):195-200. (in Chinese)
- [3] 王凯睿,徐秀丽,李雪红,等. 考虑板式支座滑动效应的桥梁振动台试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(12):68-74.
WANG Kairui, XU Xiuli, LI Xuehong, et al. Study of the concrete continuous girder bridge shaking table test considering the sliding of laminated rubber bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(12):68-74. (in Chinese)
- [4] WEI B, YANG T H, JIANG L Z, et al. Effects of

- friction-based fixed bearings on the seismic vulnerability of a high-speed railway continuous bridge[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(5):643-657.
- [5] 陈万祥,郭志昆.粘弹性支座RC梁在低速冲击下的动力响应计算[J]. *工程力学*, 2010, 27(5): 115-121.
CHEN Wanxiang, GUO Zhikun. Dynamic response of reinforced concrete beams with viscous-spring supports subjected to low velocity impact [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5):115-121. (in Chinese)
- [6] 项乃亮,崔侠侠,李建中.板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(12): 1828-1834.
XIANG Nailiang, CUI Xiaxia, LI Jianzhong. Experimental study on sliding friction behavior of laminated rubber bearing and its mechanical model[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(12): 1828-1834. (in Chinese)
- [7] 项乃亮,李建中.考虑板式支座滑移的中小跨度梁式桥振动台试验[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(7): 104-111.
XIANG Nailiang, LI Jianzhong. Shaking table tests of a short to medium-span girder bridge considering the sliding of laminated-rubber bearings[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(7):104-111. (in Chinese)
- [8] XIANG N L, LI J Z. Experimental and numerical study on seismic sliding mechanism of laminated rubber bearings [J]. *Engineering Structures*, 2017, 141(6): 159-174.
- [9] 罗锐,汪振国,雷晓燕,等.弹性支座对简支箱梁桥振动特性的影响及隔振效果研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(6): 54-61.
LUO Kun, WANG Zhenguo, LEI Xiaoyan, et al. Influence of elastic supports on the vibration characteristics of a simply supported box-girder bridge and study on its vibration isolation effect[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(6):54-61. (in Chinese)
- [10] 张志俊,李小珍,张迅,等.弹性支座对桥梁车致振动的隔振效果研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(4):103-111.
ZHANG Zhijun, LI Xiaozhen, ZHANG Xun, et al. Study on the vibration-isolation effects of elastic bearings on train induced vibration of railway bridge[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(4):103-111. (in Chinese)
- [11] 邱惠清,卢凯良,李雪,等.岸桥前大梁铰支座支承对其横向振动的影响[J]. *振动、测试与诊断*, 2009, 29(3):299-302.
QIU Huiqing, LU Kailiang, LI Xue, et al. Influence of support means of hinge-bearing for container Crane's boom on lateral vibration[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2009, 29(3):299-302. (in Chinese)
- [12] 朱志辉,罗思慧,张磊,等.车桥耦合振动的拱桥吊杆应力冲击系数分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2019, 39(6): 1169-1176.
ZHU Zhihui, LUO Sihui, ZHANG Lei, et al. Numerical studies of suspenders' stress impact factor of train and arch bridge coupled systems [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(6):1169-1176. (in Chinese)
- [13] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, FILIPOV E T, et al. Shear and friction response of nonseismic laminated elastomeric bridge bearings subject to seismic demands [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 18(7): 612-623.
- [14] 中华人民共和国铁道部. 铁运函[2004]120号 铁路桥梁检定规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2004.



第一作者简介:陈树礼,男,1978年9月生,硕士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为桥梁检测、评定与加固以及桥梁结构健康监测。曾发表《支座病害对大跨度钢桁梁桥的振动影响研究》(《振动与冲击》2017年第36卷第13期)等论文。

E-mail: chensl@stdu.edu.cn