

摩擦摆支座在大跨度预应力混凝土梁桥中的应用

吴建翔, 刘海澄

(扬州市市政建设处, 江苏 扬州 225100)

摘要: 以在建江平东路东延涉铁应急工程上跨太平河 72 m+128 m+72 m 连续梁为例, 结合桥梁特点, 分别采用摩擦摆球形支座和球形支座建立三维模型, 进行时程波抗震分析, 并对计算结果进行对比。结果表明: 采用摩擦摆支座可有效延长结构周期, 远离地震能量集中的频率区段, 降低结构地震效应; 摩擦摆销轴剪断后, 支座开始摆动, 对桥墩内力进行了重新分配, 在纵向地震力作用下固定墩内力减小约 88%, 非固定墩内力增大为原来的 4 倍左右; 固定墩和非固定墩受力和截面配筋更加均匀, 且不会引起结构损伤; 支座位移相应增大, 但梁缝和挡块间隙应能满足支座的变形需求; 横向地震力作用下固定墩和非固定墩内力均有减小, 减少了 78% 左右, 可大幅减小结构配筋。

关键词: 摩擦摆; 球形支座; 地震力; 大跨连续梁

中图分类号: U443.36

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0293-05

Application of Friction Pendulum Bearings in Long-span Prestressed Concrete Beam Bridge

WU Jianxiang, LIU Haicheng

(Yangzhou Municipal Construction Office, Yangzhou 225100, China)

Abstract: Taking the 72 m + 128 m + 72 m continuous beam spanning the Taiping River of the East Jiangping Road East Extension Railway-related Emergency Project under construction as an example, the three-dimensional models are established by using the friction pendulum bearing and spherical bearing respectively based on the characteristics of the bridge to carry out the time-history seismic analyses, and the results are compared. The results show that the adoption of friction pendulum bearings can effectively extend the structural period, and keep the structure away from the frequency zone where the seismic energy is concentrated, and reduce the seismic effect of the structure. After the friction-pendulum pin shaft is cut, the bearing begins to swing, and the internal forces of the piers are redistributed. Under the action of longitudinal seismic forces, the internal force of the fixed pier is reduced by approximately 88%, while the internal force of the non-fixed pier increases about four times. The forces and sectional reinforcement of fixed and non-fixed piers are more uniform, and will not cause the structural damage. The bearing displacement increases accordingly, but the beam joint and block clearance still meet the deformation requirements of the bearings. Under the action of transverse seismic forces, the internal forces of the fixed and non-fixed piers are reduced by about 78%, and the structural reinforcement can be greatly reduced.

Keywords: friction pendulum; spherical bearing; seismic forces; long-span continuous beam

0 引言

在我国自 2008 年至今, 汶川、玉树和雅安等地先后发生了 7 级以上大地震。相关人员调查地震后的桥梁结构时发现, 梁体大幅移位、固定支座破坏、落梁等现象是连续梁结构在地震中遭到破坏的主要原因。大跨度预应力混凝土连续梁仅设置一个抵抗纵向水平力的固定支座, 由于其上部结构质量较大, 地

震作用下水平惯性力也就较大。因此, 固定墩的抗震性能将是连续梁结构抗震分析的重点。

目前, 桥梁抗震体系一般分为刚性抗震体系、延性抗震体系和减隔震抗震体系 3 种。刚性抗震体系是指桥梁各部件在地震作用下结构刚度不发生变化, 通过结构配筋“硬抗”地震力。延性抗震是指在地震作用下桥墩在墩顶或墩底发生震后可修复的破坏, 产生了塑性变形, 而桥墩变形后减小了结构刚度, 也减小了地震效应, 进而使结构整体刚度减小, 墩柱顶位移增大, 从而达到消耗地震能量的效果^[1]。减隔震抗震体系是指减隔震支座在地震作用下发生

收稿日期: 2024-06-21

作者简介: 吴建翔(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程建设工作。

变形,通过变形消耗地震能量,同时延长结构自振周期和增大阻尼,降低地震结构响应^[2]。本桥主墩均位于太平河河道内,主墩尺寸受防洪要求限制,桥墩为圆柱墩且墩径较小。如采用延性抗震体系,固定墩将难以满足抗震要求,且震后修复难度较大,因此选用减隔震抗震体系。

减隔震支座种类繁多,其中摩擦摆式减隔震支座、铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座这3种支座在行业内认可度比较高,在项目中被广泛应用。摩擦摆式减隔震支座相对于其他两者有承载力和水平位移量均较大、可灵活转动且无污染等优势,因此摩擦摆支座被广泛应用于大跨径预应力混凝土连续梁之中。

摩擦摆支座是在普通球形支座的基础上增加了球面滑动块,球面滑板与下座板之间设置有剪力销^[3]。该支座在静力工况下剪力销不发生剪断,球面滑板不工作,此时像普通球形支座一样具有平动和转角功能,满足静力工况需求;地震来临时,剪力销被剪断,摩擦摆发挥作用,通过“摆”的机理实现结构自振周期延长,摆的长度即为支座曲面半径。摩擦摆支座本质上是一个弧面摩擦阻尼器,依靠曲面摩擦来耗散地震能量,同时梁体在球面上运动,将平动动能转换为势能,起到控制结构平动位移的作用。由于滑动面为球形圆弧,在地震之后,在结构自重作用下会滑动至滑动曲面最低点,即支座可依靠结构自重自动复位。其自动复位的特点是其他减隔震支座所不具备的。

摩擦摆支座示意图见图1。

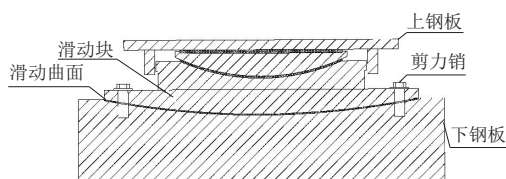


图1 摩擦摆支座示意图

1 工程实例

主桥标准横断面为0.565 m(HA级防撞护栏)+12 m(行车道)+1 m(中央分隔带)+12 m(行车道)+0.565 m(HA级防撞护栏)=26.13 m,如图2所示。采用3孔连续梁跨越河道,桥梁结构为预应力混凝土结构,跨度为72 m+128 m+72 m,梁长272 m,整幅设计,小里程侧为3×25 m预制小箱梁,大里程侧为桥台路基,如图3所示。

主桥上部结构为变高箱梁,箱梁中心线处中支

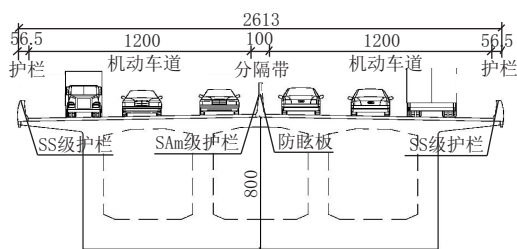


图2 主梁横向布置图(单位:cm)

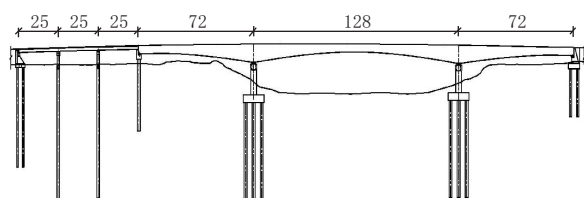


图3 依托工程桥梁立面图(单位:m)

点梁高为8.0 m,跨中梁高3.5 m。箱梁为直腹板式箱梁,单箱多室结构,主线桥梁桥面宽26.13 m,采用单箱3室箱梁;桥面为双向2%横坡,通过顶板倾斜形成,底板水平。顶板、底板厚度为30 cm,腹板厚度分2次变化,变化范围为0.5 m→0.7 m→0.9 m。

跨中主梁标准横断面见图4。

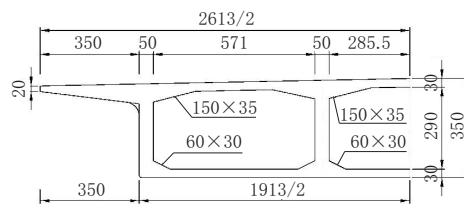


图4 跨中主梁标准横断面图(单位:cm)

桥台及基础采用径向布置,桥台采用U型台接群桩基础形式。承台厚度为2.5 m;桩基采用桩径1.5 m的钻孔灌注桩,共14根,台后设置长8 m搭板。

主墩采用双圆柱式混凝土墩,桥墩直径为3.6 m,墩顶设直径为4.0 m墩帽,墩顶采用系梁连接,基础为承台桩基础,承台高3.5 m,承台接15根钻孔灌注桩基础,桩径1.8 m;过渡墩采用桩柱式盖梁,盖梁高2.0 m,宽3.0 m,盖梁上设置错台高顶帽,错台宽1.2 m,高2.24 m,基础为6根钻孔灌注桩,桩径1.8 m。

2 有限元分析模型

2.1 地震动参数

本桥为市政工程,根据城市桥梁的抗震要求,地震参数见表1。

结构采用时程分析,地震安全评估报告提供的时程波如图5所示。

该桥采用减隔震设计,根据抗震规范相关要求,本桥的抗震设计和计算可仅考虑E2地震效应^[4-5]。本文为研究减隔震支座的抗震效果,分别采用球形

表 1 地震参数表

项目	参数
地震基本烈度	Ⅶ度区
地震动峰值加速度	0.15g
特征周期	0.4 s
场地类别	Ⅲ类
桥梁类型	乙类
抗震设计方法	A类
E1地震调整系数	0.61
E2地震调整系数	2.05

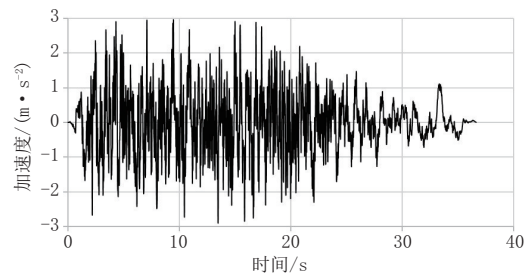


图 5 时程曲线

钢支座和摩擦摆支座进行计算,对比分析计算结果。

2.2 有限元模型

建立整体结构模型模拟主桥上部结构和下部结构。利用 MIDAS 按实际尺寸建立出上部梁体、桥墩和基础模型,并将铺装、护栏等二期荷载通过荷载转化为质量的形式添加在梁体上。两侧相邻结构对振型也有影响,因此模型中建立出了相邻孔结构。

主桥有限元计算模型见图 6。

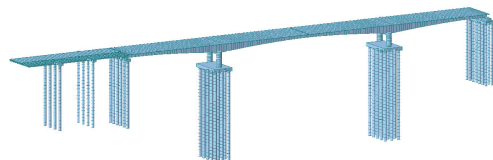


图 6 主桥有限元模型

2.2.1 结构阻尼比

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)的规定,钢筋混凝土结构的阻尼比取值为 0.05。

2.2.2 基础刚度

模型中按实际长度建立桩基长度,桩周土对桩基的约束作用采用土弹簧模拟,弹簧刚度与深度和土的抗力比例系数 m 有关。根据地勘报告提供的 m 值,动力分析时一般取 $m_{动}=2\sim3m_{静}$,模型中取值 2.5。

2.2.3 支座参数

每个桥墩处横向布置 2 个支座,支座间距 12 m,均采用摩擦摆支座。支座布置示意图见图 7;支座参数表见表 2。

模型中普通球形支座采用弹性连接模拟,连接

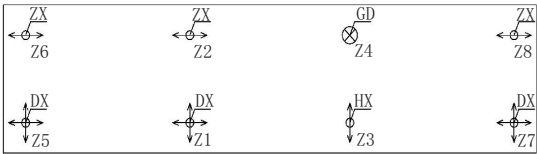


图 7 支座布置示意图

表 2 支座参数表

支座吨位/kN	类型	支座曲率半径/m		隔振位移/mm	
		横向	纵向	横向	纵向
80 000	GD	5	6	200	200
80 000	ZX	5	6	200	200
80 000	HX	5	6	200	200
80 000	DX	5	6	200	200
9 000	ZX	3	4	200	250
9 000	DX	3	4	200	250

刚度为 1×10^7 kN/m。摩擦摆支座考虑其刚度非线性采用一般连接模拟,支座根据《公路桥梁摩擦摆式减隔震支座》(JT/T 852—2013)的要求,按表 2 参数计算后输入模型。

3 计算结果分析

3.1 动力特性分析

针对 2 种支座类型,分别按上述条件建立抗震模型,并对其结构动力特性进行分析。结构振型动力特性见表 3。

表 3 动力特性对比表

模态号	球形支座		摩擦摆支座	
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
1	0.523 3	1.910 9	0.305 3	3.275 2
2	0.550 6	1.816 1	0.321 5	3.110 5
3	0.703 3	1.421 8	0.336 8	2.969 3
4	0.733 1	1.364 1	0.619 0	1.615 4
5	0.741 1	1.349 3	0.665 8	1.501 9
6	0.835 2	1.197 3	0.795 8	1.256 6
7	0.924 6	1.081 5	0.957 5	1.044 4
8	0.963 0	1.038 4	1.092 2	0.915 6
9	1.585 2	0.630 8	1.925 4	0.519 4
10	1.929 6	0.518 3	2.318 9	0.431 2

由表 3 可知,采用摩擦摆支座后,1 阶模态下结构周期提高了 1.71 倍,摩擦摆支座明显延长了桥梁的固有周期,从而能远离地震能量集中的频率区段,达到减隔震的效果。

3.2 结构内力对比分析

3.2.1 地震力作用下桥墩内力分布

为分析 2 种支座对桥墩内力分布的影响,列出了 2 种支座模型在地震力作用下的内力,其对比结果见图 8 至图 11。

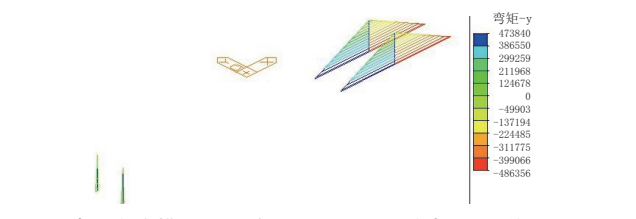


图8 球形支座模型纵向地震力作用下桥墩内力图(单位:kN·m)

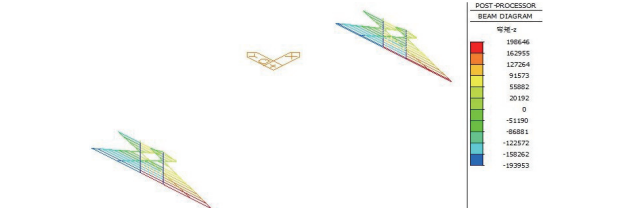


图9 球形支座模型横向地震力作用下桥墩内力图(单位:kN·m)

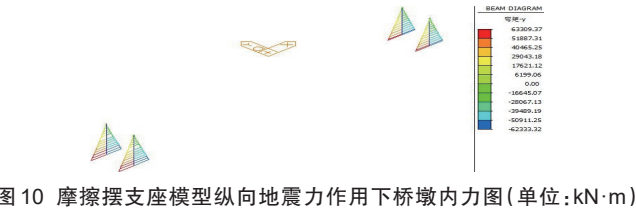


图10 摩擦摆支座模型纵向地震力作用下桥墩内力图(单位:kN·m)

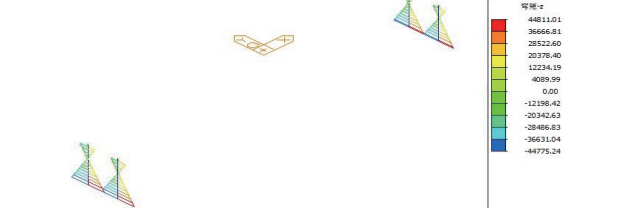


图11 摩擦摆支座模型横向地震力作用下桥墩内力图(单位:kN·m)

根据2种支座的计算结果来看,采用普通球形支座时,纵向地震力作用下固定墩墩底有较大弯矩值,横向地震力作用下2个主墩墩底均有较大弯矩值。采用摩擦摆支座时,纵向地震力和横向地震力作用下2个主墩墩底均有较大弯矩值。这是因为摩擦摆支座销轴剪断后,桥墩协同作用,所有桥墩共同承担地震力所致。而2种支座横向弯矩规律相同的原因

是采用普通球形支座时所有桥墩都对横向进行了约束,致使所有桥墩共同承受了横向地震力。

3.2.2 地震力作用下桥墩内力值对比

地震力作用下桥墩内力和桥墩截面验算结果见表4、表5。

由表4、表5可知:纵向地震力作用下采用摩擦摆支座可大幅度减小固定墩剪力和弯矩值,剪力和弯矩约为原来的11.5%~12.2%;非固定墩的内力和弯矩则大幅度增加,约为原来的3.6~4.5倍。横向地震力作用下采用摩擦摆支座可大幅度减小固定墩和非固定墩的剪力、弯矩值,剪力和弯矩约为原来的20%~24%。由此可见,摩擦摆支座优化了结构内力,使固定墩和非固定墩受力更加均匀,截面配筋也更容易满足《公路桥梁抗震设计规范》的要求。

3.2.3 地震力作用下支座计算结果

3.2.3.1 球形钢支座承载力分析

理论上普通球形支座在地震力作用下不能剪断,应对支座承载力进行验算,其计算结果见表6。

由表6可知:球形支座横向剪力最大值为42 925 kN,纵向剪力最大值为39 188 kN,支座吨位为80 000 kN,支座水平承载力需达到54%以上才能满足要求。但是,常规球形钢支座的水平承载力一般为其承载力的20%,因此,球形支座承载力不满足《公路桥梁抗震设计规范》的要求。

3.2.3.2 摩擦摆支座位移分析

当地震力大于E1地震效应时,支座被剪断,剪断力为10 000 kN,占支座承载力的12.5%。支座剪断后,摩擦摆支座需要通过摆动才能达到耗能效果,因此地震作用下支座会有较大位移。地震力作用下支座的活

动位移应小于其隔震位移,计算结果如表7所列。

表4 地震力作用下控制截面内力							
地震力	构件	普通球形支座			摩擦摆支座		
		轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
纵向地震力	固定墩墩底	-6.977×10 ⁴	3.958×10 ⁴	4.738×10 ⁵	-7.267×10 ⁴	4.574×10 ³	5.789×10 ⁴
	非固定墩墩底	-7.007×10 ⁴	1.379×10 ³	1.397×10 ⁴	-7.297×10 ⁴	4.978×10 ³	6.331×10 ⁴
横向地震力	固定墩墩底	-4.005×10 ⁴	2.373×10 ⁴	1.879×10 ⁵	-6.490×10 ⁴	4.945×10 ³	4.045×10 ⁴
	非固定墩墩底	-3.915×10 ⁴	2.185×10 ⁴	1.986×10 ⁵	-6.484×10 ⁴	5.224×10 ³	4.481×10 ⁴

表5 地震力作用下控制截面验算							
地震力	构件	普通球形支座			摩擦摆支座		
		弯矩需求/(kN·m)	抗弯能力/(kN·m)	能力需求	弯矩需求/(kN·m)	抗弯能力/(kN·m)	能力需求
纵向地震力	固定墩墩底	4.738×10 ⁵	1.724×10 ⁵	0.360	5.789×10 ⁴	1.675×10 ⁵	2.890
	非固定墩墩底	1.397×10 ⁴	6.629×10 ⁴	4.740	6.331×10 ⁴	1.733×10 ⁵	2.740
横向地震力	固定墩墩底	1.879×10 ⁵	1.775×10 ⁵	0.940	4.045×10 ⁴	1.491×10 ⁵	3.690
	非固定墩墩底	1.986×10 ⁵	1.789×10 ⁵	0.900	4.481×10 ⁴	1.575×10 ⁵	3.510

表 6 支座剪力汇总表 单位:kN

支座号	横向剪力	纵向剪力
1	—	—
2	40 262	—
3	—	39 186
4	42 925	39 188

表 7 摩擦摆支座隔震位移汇总表 单位:cm

地震作用下摩擦摆支座位移	实际位移	允许位移
纵向	16.9	20
横向	14.7	20

由表 7 可知:主墩顶摩擦摆支座的纵向最大位移为 16.9 cm,横向最大位移为 14.7 cm,而摩擦摆支座隔震位移为 20 cm,因此摩擦摆支座位移满足《公路桥梁抗震设计规范》的要求。

4 结 语

(1)摩擦摆支座在地震作用下销轴被剪断,开始摆动,从而延长了结构周期,使其能避开地震能量集中频率区段,起到了减震作用,且支座的摆动也起到

了消耗地震能量的作用。

(2)摩擦摆支座变形耗能后可减小传递至桥墩的地震力,并且使传递至桥墩的内力重新分配,使各墩协同承受地震力。纵向地震力作用下固定墩内力减小约 88%,而非固定墩内力增加为原来的 4 倍左右。横向地震力作用下固定墩和非固定墩内力均有减小,减少了 78% 左右。

(3)对大跨度预应力混凝土连续梁而言,普通球形支座难以满足其抗震要求。摩擦摆支座会产生较大位移,但梁缝和挡块间隙应能满足支座的变形需求。

参考文献:

[1] 王平.连续桥梁减隔震设计与分析[J].北方交通,2021(4):9-12.
[2] 郝润霞,黄嘉奇.摆式球形摩擦摆支座理论与有限元模拟分析[J].内蒙古科技大学学报,2024,43(1):41-45.
[3] 臧博.基于摩擦摆支座的矮墩连续梁桥隔震性能研究[J].山西交通科技,2023,285(6):85-88.
[4] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
[5] CJJ-166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

