

林子力, 许芸熙. 大跨度桥梁支座抗震性能模拟研究[J]. 华南地震, 2025, 45(3): 124-131. [LIN Zili, XU Yunxi. Simulation Study on Seismic Performance of Large-Span Bridge Bearings [J]. South China journal of seismology, 2025, 45(3): 124-131]

## 大跨度桥梁支座抗震性能模拟研究

林子力, 许芸熙

(云南省交通规划设计研究院股份有限公司, 昆明 650041)

**摘要:** 由于传统桥梁支座抗震性能研究不能模拟不同的地震场景和参数变化, 且不能对大跨度桥梁的性能进行多维度评估, 导致大跨度桥梁支座抗震性能较差。为解决这一问题, 选取某大跨度铁路钢桁架拱桥为研究对象, 选取四种不同类型的支座, 利用三维空间有限元软件 Abaqus 构建研究对象三维空间有限元模型, 分析不同地震动输入条件下研究对象支座抗震性。结果显示: 摩擦摆减、隔震支座在研究对象内产生显著的限位功能, 令全部支座纵桥向变形水平抑制在 0.85 m 范围内; 研究对象采用摩擦摆减、隔震支座时对地震作用下主梁位移产生相应的约束作用; 地震动影响下, 摩擦摆减、隔震支座变形大于其自由程状态, 其限位功能被启动产生纵向约束, 由此造成研究对象上部结构传至桥塔与桥墩的地震内力值提升; 研究对象采用摩擦摆减、隔震支座后, 在不同地震动条件下不同桥墩之间能够实现协同抗震; 研究对象采用摩擦摆减、隔震支座后在不同地震动作用下均维持弹性状态, 符合预期设定的抗震目标。

**关键词:** 大跨度; 桥梁支座; 抗震性能; 有限元模拟; 地震动; 限位功能

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)03-0124-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.03.15

## Simulation Study on Seismic Performance of Large-Span Bridge Bearings

LIN Zili, XU Yunxi

(Yunnan Provincial Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Kunming 650041, China)

**Abstract:** Due to the inability of traditional research on the seismic performance of bridge bearings to simulate different seismic scenarios and parameter changes, and the inability to conduct multidimensional evaluations of the performance of large-span bridges, the seismic performance of large-span bridge bearings is poor. To solve this problem, a large-span railway steel truss arch bridge was selected as the research object. Four different types of supports were selected, and a three-dimensional spatial finite element model of the research object was constructed by using the three-dimensional spatial finite element software Abaqus. The seismic performance of the research object's bearings under different ground motion input conditions was analyzed. The results show that the friction pendulum reduction and isolation bearings have a significant limiting function within the research object, which suppresses the longitudinal bridge deformation level of all bearings within the range of 0.85 m. The research object uses friction pendulum reduction and isolation bearings to exert corresponding constraint effects on the displacement of the main beam under seismic action. Under the influence of ground motion, friction reduction and

收稿日期: 2024-06-24

作者简介: 林子力(1989-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为桥梁设计及抗震。

E-mail: 17123313@163.com

deformation of isolation bearings are greater than their free path state, and their limiting function is activated to generate longitudinal constraints, resulting in an increase in the seismic internal force value transmitted from the upper structure of the research object to the bridge tower pier. After using friction pendulum reduction and isolation bearings, the research object can achieve collaborative seismic resistance between different bridge piers under different ground motion conditions. The research object maintains an elastic state under different seismic ground motions after using friction pendulum reduction and isolation bearings, which meets the expected seismic target.

**Keywords:** Large span; Bridge bearings; Seismic performance; Finite element simulation; Ground motion; Limiting function

## 0 引言

大跨度桥梁作为连接重要交通节点、促进区域经济发展的关键工程结构,其安全性与稳定性受到广泛关注<sup>[1]</sup>。然而,地震作为一种不可预测的自然灾害,对桥梁结构的安全构成了严重威胁。桥梁支座在桥梁结构中扮演着重要角色,承载着桥梁的重量,同时传递荷载和调节桥梁变形<sup>[2]</sup>。在地震作用下,桥梁支座需要抵御来自不同方向的复杂荷载,其抗震性能直接影响桥梁整体的稳定性。因此,对大跨度桥梁支座的抗震性能进行模拟研究具有重要意义<sup>[3]</sup>。

近年来,已经有很多学者对桥梁支座抗震性能进行了研究。例如,余小晴等人通过增量动力方法针对板式橡胶支座对于桥梁抗震性能的影响进行研究,结果显示纵向地震动影响下,桥梁支座有大概率形成脱空与滑落等问题<sup>[4]</sup>。Siringoringo等人对在主塔和桥墩处采用层压橡胶支座进行隔震的桥梁抗震性进行研究,结果显示层压橡胶支座可通过提升桥梁结构阻尼的方式降低桥梁结构在地震作用下的反应<sup>[5]</sup>。龚婉婷等人对混凝土拱桥的支座隔震性能进行研究,结果显示设防烈度较低条件下,摩擦摆支座对于桥梁结构的地震响应产生控制作用;而相反条件下,控制效果下降<sup>[6]</sup>。Takahashi等人提出了考虑压缩力影响的高阻尼橡胶支座的速率相关本构模型,研究了加载速率和压缩力对高阻尼橡胶支座力学性能的影响。结果显示在近断层脉冲状地震动作用下,高阻尼橡胶支座的速率相关行为更加明显,它可能会影响隔震结构的地震反应,在隔震设计中应予以注意<sup>[7]</sup>。王萌等人关于近场脉冲地震下间隙式SMA-NSD摩擦支座简支桥梁隔震研究意义多。优点:隔震性能上有效耗散能量、减小桥梁响应;结构稳定性上支座自复位、增强结构整体性;经济性上减少维修成本、延长桥梁寿命。缺点:材料和设计方面,SMA材料成本高、设计复

杂;性能稳定性方面,受环境影响、长期性能不确定<sup>[8]</sup>。上述文献在研究过程中都忽略了大跨度桥梁的特性。

为解决上述方法存在的问题,提出大跨度桥梁支座抗震性能模拟方法,为大跨度桥梁的抗震性提供新的研究方向。

## 1 大跨度桥梁支座抗震性能模拟方法

### 1.1 工程概况

以某大跨度铁路钢桁架拱桥为研究对象,其所处区域为标准的高山峡谷“V”型地貌。研究对象所处区域的地震基本烈度与场地类别分别为Ⅷ度和Ⅱ类,反应谱特征周期与基础地震动峰值加速度分别为0.5 s和0.205 g。研究对象设计过程中的抗震设防水平包括两种,分别是设计地震与罕遇地震<sup>[8]</sup>,整体设防目标为:设计地震条件下不被破坏,罕遇地震条件下可以修葺。表1所示为研究对象内不同部件的设计目标。

研究对象的桥式设计为主跨上承式钢桁架双线拱桥,主跨达到400 m。研究对象整体跨度主要分为三部分,具体如下:

- (1)不间断钢箱梁:2×43 m;
- (2)钢桁拱桥:400 m;
- (3)不间断钢箱梁:2×36 m;

研究对象选取提篮拱形式设计拱肋,矢高可达90 m;拱顶区域的桁宽和桁高分别达到10.5 m和8 m,而拱脚区域的桁宽和桁高分别达到25.5 m和14 m。研究对象主梁在拱顶区域和拱肋区域均为上弦固结<sup>[9]</sup>,在其余墩柱区域均采用钢制支座。

### 1.2 支座隔震设计与相关参数

支座隔震设计旨在减少建筑物或桥梁在地震作用下的振动反应,保护结构免受严重破坏。通过设

表1 研究对象内不同部件的设计目标

Table 1 Design objectives of different components within the study subjects

抗震设防目标	构件		
	拱圈肋、拱座、主梁	引桥墩、交界墩、拱上立柱、拱肋横撑	支座、伸缩缝
设计地震	整体结构部被损伤,处于稳定的弹性状态		
罕遇地震	轻微损伤,保持基本弹性	所受损伤能够被修复,处于弹塑性状态	允许破坏

置相关参数,包括减少振动幅度、缓解动态荷载、提高结构稳定性和保护人员财产安全,支座隔震设计能有效降低地震影响下结构的危险,增强抗震防灾能力,确保结构在地震事件中更安全可靠。一般情况下,桥梁所使用的支座主要分为以下几种类型:

(1)板式橡胶支座利用提升桥梁结构的柔性来延长桥梁结构周期,以此实现抑制地震影响、不同桥墩共同抗震、一起达到降低地震影响、地震结束后能够自动恢复原位的目的。该类型支座在地震过程中可与桥梁墩(梁)发生相对滑动,借助滑动隔振效应有效降低地震对桥梁的作用<sup>[10]</sup>,由此保障桥梁在地震过程中稳定性与安全性。但该类型支座在实际应用过程中也存在一定缺陷,例如滑动位移无法自动复原、支座发生滑动后将产生相应的不可预见性,由此造成有一定概率会出现桥梁落梁等问题。

(2)铅芯橡胶支座在板式橡胶支座性能优势的基础上,还利用提升桥梁结构阻尼的方式降低桥梁结构在地震作用下的反应<sup>[11]</sup>,是一种优秀的、且被普遍使用的隔震、抗震装置。但该类型支座使用过程中,纵向承载力具有显著约束性,无法运用在大

跨连续梁桥内。

(3)E型钢支座是由盆式橡胶支座与E型钢阻尼器共同组成,其被普遍应用在大跨桥梁中。但该类型支座在实际应用过程中会存在E型钢阻尼器位移约束显著、体积较大以及型式复杂等问题。

(4)以曲面滑动隔振理论为基础设计的摩擦摆减、隔震支座主要优势为单价小、应用过程简单、负载性能优,在包含一般平面滑动隔振系统的特性基础上,同样具备优质的稳定性、地震过后的自动复位能力以及抗平扭性能,因此被广泛应用在大跨度桥梁中。

恒载条件下,研究对象联间墩单一支座的反力大致为25 000 kN,因此研究对象隔震、抗震应用中对支座的承载性能要求相对较高,整体考虑上述四种类型的支座性能,选取E型钢支座与摩擦摆减、隔震支座进行模拟分析,单幅桥的不同中墩顶部区域设置两个支座,不同过渡墩的顶部区域则设置四个支座。以保障协调研究对象内不同墩的受力情况,并获取优质的减震、隔震效果,设定研究对象所使用支座的主要技术参数如表2所示。

表2 支座主要设计参数

Table 2 Main design parameters of bearings

墩号	滑动摩擦系数	恒载支座反力/kN	摩擦摆支座的曲率半径/m	摆动刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )
5	0.04	3296	6	648
6	0.04	23 270	6	4543
7	0.04	25 495	6	4988
8	0.04	24 655	6	4820
9	0.04	25 004	6	4890
10	0.04	24 852	6	4859
11	0.04	24 933	6	4875
12	0.04	24 853	6	4859
13	0.04	25 003	6	4889
14	0.04	24 655	6	4820
15	0.04	25 495	6	4988
16	0.04	23 263	6	4541
17	0.04	3294	6	648

### 1.3 有限元模型

#### 1.3.1 模型构建

通过 Abaqus 软件构建三维空间有限元模型, 利用等效弹性模量法和 MAT\_Cable 模型对支座进行模拟。等效弹性模量的计算公式使用 Ernst 公式确定:

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{\partial l_c^2}{12\mu^3} E} \quad (1)$$

式(1)内,  $E_{eq}$  和  $E$  分别表示研究对象支座的等效模量和弹性模量,  $\partial$  和  $l_c$  分别表示研究对象支座的重量与水平投影长度,  $\mu$  表示研究对象支座的拉应力。

选取单主梁模式内的“鱼刺梁”方法, 通过梁单元对研究对象的主梁进行模拟。通过两单元对研究对象的桥塔与墩柱进行模拟, 所使用的模型为 MAT\_RC\_Beam 模型, 通过自定义的方式对研究对象墩柱桥塔截面进行定义。通过 MAT\_SPRING\_GENERAL\_NONLINEAR 模型定义研究对象内部支座材料, 并描述支座力通变形之间的相关性。研究对象桩基的模拟选用集中质量法<sup>[12-13]</sup>, 以显示环境中的桩土相互作用简化为质量—弹簧—阻尼系统, 通过弹簧描述研究对象结构和土体之间的相互作用。选取量单元对研究对象的桩基进行模拟, 对研究对象群桩底层区域的纵向自由度进行约束, 利用 m 法获取桩土彼此影响过程土弹簧的刚度<sup>[14]</sup>。正常情况下, 研究对象的桥墩浸水深度可达 20 m 左右, 利用附加动水质量描述动水压力的影响。研究对象内部的钢筋与混凝土相关参数如表 3 所示。

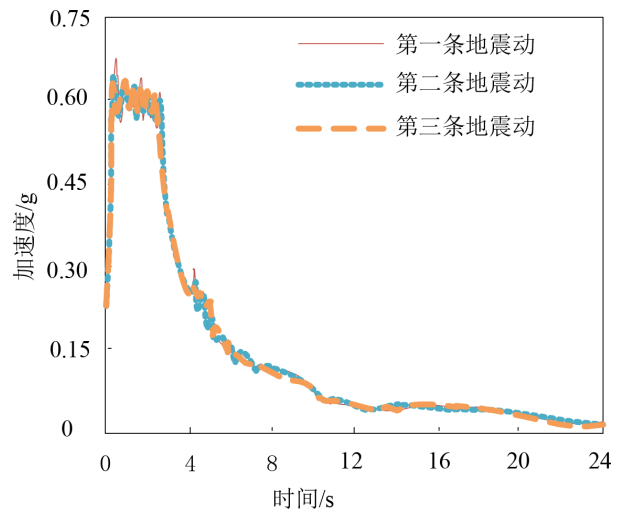
表 3 研究对象内部的钢筋与混凝土相关参数

Table 3 Parameters related to reinforcement and concrete within the study subjects

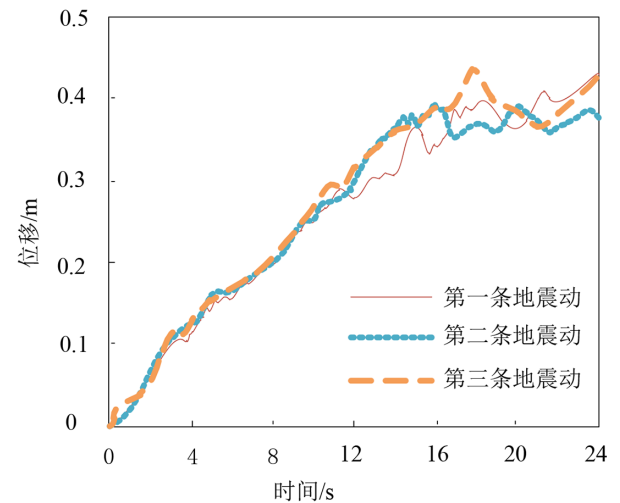
内部结构	相关参数	具体数值
钢筋	应力上限	460 MPa
	应变上限	0.25
	屈服应力	340 MPa
	弹性模量	210 GPa
	泊松比	0.3
混凝土	密度	2480 kg/m <sup>3</sup>
	抗压强度	40.0 MPa
	应变峰值	0.0025
	弹性模量	4000 MPa
	泊松比	0.22

#### 1.3.2 地震动输入

进行支座抗震性能模拟研究时, 需进行非线性地震反应时程分析, 输入具有 2% 超越概率的三条半世纪内地震动<sup>[15]</sup>。输入地震动的伪加速度与位移谱如图 1 所示。



(a) 伪加速度谱



(b) 位移谱

图 1 地震动输入情况

Fig.1 Ground motion input situation

## 2 实验

### 2.1 实验准备

为研究大跨度桥梁不同类型支座的抗震性能, 针对 2.1 小节中的研究对象, 在第一条地震动条件下, 设置下述四种不同的工况, 设定支座的自由程与水平刚度分别为 50 mm 和  $3 \times 10^5$  kN/m, 针对不同

工况构建对应的有限元模型。

(1)第一种工况：研究对象过渡墩、辅助墩顶以及桥塔区域均安装E型钢支座；

(2)第二种工况：研究对象过渡墩、辅助墩顶以及桥塔区域均安装摩擦摆减、隔震支座；

(3)第三种工况：研究对象桥塔区域和辅助墩顶区域均安装摩擦摆减、隔震支座，而过渡墩顶区域安装E型钢支座；

(4)第四种工况：研究对象桥塔区域安装摩擦摆减、隔震支座，过渡墩辅助墩顶部区域安装E型钢支座。

## 2.1 不同类型支座的抗震性能测试

不同工况条件下，研究对象过渡墩、辅助墩以及桥塔纵桥向墩梁相对位移值，如表4所示。

表4 不同工况下桥墩梁纵桥向相对位移对比

Table 4 Comparison of relative displacement of pier beam along longitudinal direction under different working conditions

桥墩号	墩梁相对位移/m			
	第一种工况	第二种工况	第三种工况	第四种工况
3	0.369	0.074	0.231	0.221
4	0.301	0.06	0.063	0.148
5	0.283	0.085	0.082	0.085
6	0.302	0.071	0.082	0.085
7	0.307	0.061	0.062	0.126
8	0.368	0.08	0.213	0.209
9	0.359	0.078	0.204	0.187
10	0.323	0.073	0.21	0.191

分析表4内的数据能够得到，在第一条地震动影响下：

(1)第一种工况下墩梁相较于其他墩梁的相对位移较大，相对位移上限达到0.369 m。

(2)与第一种工况相比，第二种工况下，研究对象整体安装摩擦摆减、隔震支座，桥塔、桥墩区域所产生的相对位移都呈现出显著下降的趋势，下降幅度高于70%。

(3)第三种工况下，研究对象桥塔和辅助墩区域的纵桥向相对位移下降幅度在70%以上，而过渡墩区域的纵桥向相对位移依旧显著。

(4)第四种工况下研究对象过渡墩、辅助墩以及塔桥区域的相对位移均呈现出一定程度的下降趋势，桥塔区域支座变形仅为0.085，而纵桥向相对位移值下降幅度达到70%以上，但安装E型钢支座区域的相对位移依旧较为显著。

综合上述结果能够得到，摩擦摆减、隔震支座在研究对象内产生显著的限位功能，研究对象整体采用摩擦摆减、隔震支座能够令全部支座纵桥向变形水平抑制在0.85 m范围内，由此说明为保障研究对象的桥墩与桥塔区域不会形成大纵向相对位移，研究对象的支座最好使用摩擦摆减、隔震支座。

在第一条地震动条件下，第一种工况与第二种工况时研究对象主梁位移时程波动情况如图2所示。

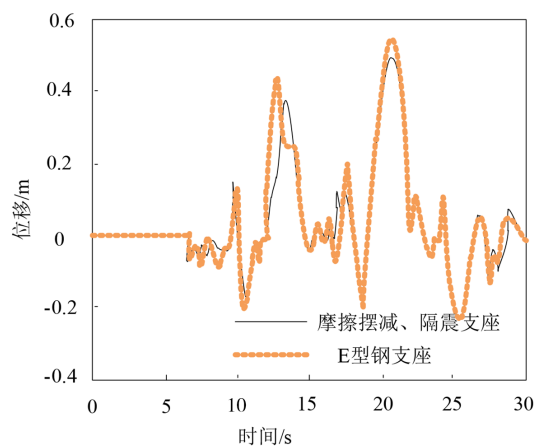


图2 研究对象主梁位移时程曲线图

Fig.2 Time history curve of main beam displacement of study subject

分析图2能够得到，第一种工况与第二种工况时研究对象主梁峰值位移分别为0.53 m和0.49 m。第二种工况下研究对象主梁纵桥向峰值位移与工况相比呈现下降趋势，由此说明研究对象采用摩擦摆减、隔震支座时对地震作用下主梁位移产生相应的约束作用。

在第一条地震动条件下，第一种工况与第二种工况时，研究对象桥塔塔底、墩底纵桥向地震内力波动情况如表5所示。

表5 前两种工况下桥塔墩底纵桥向地震内力值

Table 5 Seismic internal force value along longitudinal direction at the bottom of the bridge tower pier under the first two working conditions

桥墩号	剪力/kN		
	第一种工况	第二种工况	第二种工况与第一种工况相比的增幅/(%)
3	48 900	70 800	44.79
4	52 500	65 600	24.95
5	27 800	40 300	44.96
6	29 700	43 000	44.78
7	43 100	53 600	24.36
8	59 200	82 500	39.36
9	58 400	83 100	42.29
10	56 700	81 900	44.44

分析表5内的数据能够得到,第二种工况下,也就是研究对象安装摩擦摆减、隔震支座时,桥塔与墩底受力情况与第一种工况相比较大。其中研究对象桥塔塔底剪力提升幅度最为显著,剪力增幅上限为44.96%,过渡墩与辅助墩的剪力提升水平也较大。产生这种情况的主要原因为,在第一条地震动影响下,研究对象采用的摩擦摆减、隔震支座变形大于其自由程状态,摩擦摆减、隔震支座的限位功能被启动,能够产生纵向约束,由此造成研究对

象上部结构传输至桥塔与桥墩的地震内力值提升。

综上所述,研究对象采用摩擦摆减、隔震支座的抗震性能优于E型钢支座。因此在后续实验过程中,主要研究摩擦摆减、隔震支座在不同地震动影响下的抗震性能。

### 3.2 不同地震动影响下的变化

表6所示为不同地震动条件下,研究对象3~10号桥墩在顺桥向的地震反应。

表6 不同地震动条件下桥墩顺桥向的地震反应

Table 6 Seismic response of bridge piers along bridge under different ground motion conditions

桥墩号	时程反应	第一条地震动	第二条地震动	第三条地震动	上限值
3	支座位移/m	0.218	0.147	0.143	0.218
	墩底弯矩/kN·m	59 370	54 878	51 370	59 370
4	支座位移/m	0.212	0.143	0.138	0.212
	墩底弯矩/kN·m	69 366	60 702	55 693	69 366
5	支座位移/m	0.21	0.142	0.137	0.21
	墩底弯矩/kN·m	71 397	62 069	56 875	71 397
6	支座位移/m	0.209	0.141	0.136	0.209
	墩底弯矩/kN·m	73 245	62 970	57 506	73 245
7	支座位移/m	0.201	0.139	0.129	0.201
	墩底弯矩/kN·m	76 744	68 309	60 650	76 744
8	支座位移/m	0.197	0.137	0.123	0.197
	墩底弯矩/kN·m	77 324	75 755	66 466	77 324
9	支座位移/m	0.197	0.137	0.125	0.197
	墩底弯矩/kN·m	76 862	73 708	66 315	76 862
10	支座位移/m	0.194	0.137	0.124	0.194
	墩底弯矩/kN·m	80 532	74 974	68 262	80 532

分析表6能够得到:研究对象采用摩擦摆减、隔震支座可令研究对象各墩在不同地震动条件下所承受的作用力相对平均,也就是研究对象采用摩擦摆减、隔震支座后,在不同地震动条件下不同桥墩之间能够实现协同抗震。产生这种情况的主要原因是研究对象的不同桥墩之间高度差值并不显著,同时桥墩的刚度值差异也较小;研究对象除两侧跨外

中间区域的梁跨依照等跨设定,支座反力差异较小,在安装相同的摩擦摆减、隔震支座后,支座的刚度差异也较小,因此对于研究对象不同墩在不同地震动作用下的协同抗震产生积极影响。

对研究对象截面弯矩一曲率间的相关性进行分析,确定研究对象截面的初屈服弯矩,结果如表7和表8所示。

表7 研究对象墩底截面抗震性能分析结果

Table 7 Analysis results of seismic performance of the pier bottom section of the study object

计算方向	纵桥向/(kN·m)	横桥向/(kN·m)
地震弯矩	84 890	99 302
屈服弯矩	$1.87 \times 10^5$	$3.05 \times 10^5$
弯矩对比	地震弯矩<屈服弯矩	地震弯矩<屈服弯矩
验算结论	通过	通过

表8 研究对象桩身截面抗震性能分析结果

Table 8 Analysis results of seismic performance of pile body section of the study object

计算方向	纵桥向/(kN·m)	横桥向/(kN·m)
地震弯矩	6220	8035
屈服弯矩	7624	8363
弯矩对比	地震弯矩<屈服弯矩	地震弯矩<屈服弯矩
验算结论	通过	通过

从表7和表8的数据与结果可知,研究对象采用摩擦摆减、隔震支座后,桥墩与桩基础的地震弯矩小于屈服弯矩,在地震动作用下维持弹性状态,达成预期抗震目标。然而,文章结果分析后的结论部分虽有,但讨论部分存在不足。就误差来源而言,测量仪器存在精度限制,如传感器灵敏度不够高会使测量数据有偏差;模型简化假设可能忽略结构连接部分影响,导致弯矩分布与实际不符;地震动输入具有不确定性,所选记录可能未涵盖最不利情况。研究也存在局限性,样本数量有限,可能无法代表所有结构类型和工况;工况设置不够全面,未考虑极端或组合地震工况;且未涉及摩擦摆减、隔震支座的长期性能,如多次地震循环后的性能变化和耐久性等。

### 3 结论

本文研究大跨度桥梁支座抗震性能模拟方法,以某大跨度桥梁为研究对象,构建有限元模型,分析研究对象在采用不同类型支座条件下的抗震

性能。结果显示:

(1)为保障研究对象的桥墩与桥塔区域不会形成大纵向相对位移,研究对象的支座最好使用摩擦摆减、隔震支座。

(2)研究对象采用摩擦摆减、隔震支座时对地震作用下主梁位移产生相应的约束作用。

(3)研究对象采用摩擦摆减、隔震支座后,在不同地震动条件下不同桥墩之间能够实现协同抗震。

(4)研究对象采用摩擦摆减、隔震支座后,在地震动作用下均维持弹性状态,符合预期设定的抗震目标。

#### 参考文献

- [1] 张精岳,王志强,刘福康.摩擦摆支座磨损对长联大跨连续梁桥抗震性能的影响[J].中外公路,2022,42(05):145-150.
- [2] 孙建鹏,主父高林,赵健,等.一种基于自适应屈曲装置的减隔震支座研究[J].桥梁建设,2023,53(05):24-32.
- [3] 黄襄云,邓春香,刘彦辉.强震下港珠澳连续梁隔震桥抗

- 震性能研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(03): 501-508+550.
- [4] 余小晴, 吴刚, 吴必涛. 板式橡胶支座摩擦性能对中小跨径梁桥地震响应影响分析[J]. 公路, 2023, 68(05): 176-182.
- [5] Siringoringo D M, Fujino Y, Suzuki M, et al. Implementation of wireless sensor network for continuous seismic monitoring of isolated cable-stayed bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(4): 115-121.
- [6] 龚婉婷, 钱永久, 杨华平, 等. 铁路劲性骨架混凝土拱桥减隔震方案优化研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(01): 55-62.
- [7] Takahashi Y, Takeuchi T, Yoneda M, et al. E-Isolation: high-performance dynamic testing installation for seismic isolation bearings and damping devices[J]. International Journal of High-Rise Buildings, 2023, 12(1): 93-105.
- [8] 王萌, 李承甜, 唐雨晴, 等. 近场脉冲地震下间隙式SMA-NSD摩擦支座筒支桥梁隔震研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(04): 37-44.
- [9] 艾建杰, 张玉苹. 大跨度桥梁桥墩延性抗震结构响应数值仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(06): 121-124+224.
- [10] 徐略勤, 贺洪滔, 张超, 等. 基于易损性曲线的斜拉桥横向抗震性能评估[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(03): 17-25.
- [11] 马安财, 刘良坤, 谭平, 等. 基于分布参数模型深水隔震连续梁桥地震响应分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(04): 1002-1013.
- [12] 王富强, 季日臣, 夏修身. 矮塔斜拉桥墩高对摩擦摆支座隔震性能的影响研究[J]. 公路工程, 2022, 47(06): 62-67+73.
- [13] 项长生, 赵竞. 不同阻尼器对连续梁桥横向抗震性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(01): 102-110.
- [14] 江辉, 宋光松, 刘展铄, 等. 近断层地震下大跨度铁路钢桁架拱桥减震技术研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(04): 95-105.
- [15] 王洪鑫, 徐略勤, 熊光泽, 等. 超长联连续梁桥考虑行波效应的减震优化研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(05): 132-141.