

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.015



# 非规则曲线桥梁漂浮抗震体系理论 及试验研究

闫磊<sup>1</sup>, 李青宁<sup>2</sup>, 赵花静<sup>2</sup>, 程龙飞<sup>1</sup>, 郭远臣<sup>1</sup>, 申纪伟<sup>1</sup>

(1. 重庆三峡学院 土木工程学院, 重庆 404100; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 强烈地震使得桥梁结构灾变严重, 非规则曲线桥梁表现更为突出。首先, 提出适用于非规则曲线桥梁的一种新型抗震体系—漂浮抗震体系, 并阐明其基本概念; 其次, 建立该体系的基本力学模型, 并推导其动力方程; 最后, 以一座相似比为 1/20 的非规则曲线桥梁为对象, 采用不同地震波分别对其进行地震模拟振动台试验研究。研究表明: 支座滑动后, 梁体加速度峰值相比墩顶有不同程度降低, 最大降低率达 65%; 试验过程中, 墩梁相对位移较大, 防落梁限位装置的设置在非规则曲线桥梁中不可或缺; 试验结束后, 模型桥梁损伤较小, 未出现落梁、整体倒塌等严重震害, 证明该体系具有良好的抗震性能, 应用于高烈度地区非规则曲线桥梁的抗震设计完全可行。

**关键词:** 非规则曲线桥梁; 漂浮抗震体系; 振动台试验; 抗震性能

**中图分类号:** U442.55      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2018)04-0103-08

## Theoretical and experimental investigation on irregular curved bridge with floating system

Yan Lei<sup>1</sup>, Li Qingning<sup>2</sup>, Zhao Huajing<sup>2</sup>, Cheng Longfei<sup>1</sup>, Guo Yuanchen<sup>1</sup>, Shen Jiwei<sup>1</sup>

(1. School of civil engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** The bridge structure is seriously damaged due to strong motion earthquake, and the irregular curved bridge is response more obvious. According to the above, a new seismic system of the irregular curved bridge-floating seismic system has been proposed and the basic concept was elaborated at first. Secondly, the basic mechanical model of the system was established and dynamic equation of the system was derived. Finally, a 1/20 scale curved bridge model with floating seismic system was been built and the

**收稿日期:** 2017-09-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(51508453); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601019); 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2015jcyjA00022, cstc2017jcyjAX0085); 重庆市高校创新团队建设计划项目(CXTDX201601034); 重庆三峡学院三峡库区工程结构防灾减灾与安全创新团队项目(17ZP08, 17RC06, 17ZZ03)

**作者简介:** 闫磊(1988-), 男, 博士, 主要从事结构振动控制与防灾减灾研究, E-mail: yanlei1988413@163.com.

**Received:** 2017-09-15

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51508453); Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission (No. KJ1601019); Natural Science Foundation Project Chongqing CSTC (No. 2015jcyjA00022, 2017jcyjAX0085); Innovation Team Construction Project of Chongqing (No. CXTDX201601034); Project of Disaster Prevention, Reduction and Safety Innovation Team of Engineering Structure in Three Gorges Reservoir area of Chongqing Three Gorges University (No. 17ZP08, 17RC06, 17ZZ03)

**Author brief:** Yan Lei (1988-), PhD, main research interests: structural vibration control and disaster prevention and mitigation, E-mail: yanlei1988413@163.com.

shaking table test was conducted with different seismic waves. The results show that, peak acceleration at the top of the pier decreased to some extent compared with the top of pier after the bearings sliding, the maximum reduction rate was 65%. During the test, the relative displacement of pier beam was larger, so the design of the anti fall beam device should be focused on. After the test, there was no serious damages such as beam falling and collapse. It indicates that the seismic performance of the floating seismic system was satisfactory and it could be used for designing curved bridges in high seismic intensity areas.

**Keywords:** irregular curved bridge; floating seismic system; shaking table test; seismic behavior

在美国 2007 版桥梁抗震设计规范<sup>[1]</sup>修订以前, 加州地区桥梁结构形式多采用墩梁固结形式, 其结构形式类似于中国的刚构桥。美国北岭地震中, 采用墩梁固结的桥梁结构墩顶或墩底遭受严重破坏<sup>[2]</sup>。阪神地震与美国北岭地震震害程度相似, 亦是由于桥墩的延性不足造成了脆性破坏<sup>[3]</sup>。汶川及玉树地震使中国经济损失惨重, 桥梁破坏形态出现了许多与以往地震中不一致的情况, 表现为支座、梁体滑移明显但桥墩及基础损伤较小<sup>[4-9]</sup>。已有研究表明, 以上两次地震中产生桥梁震害的主要原因是大部分桥梁均采用了普通板式橡胶支座且在未设置任何锚固措施的前提下直接放置于墩顶或者盖梁之上, 地震作用下极易产生梁体横纵向位移、挡块剪切破坏、邻梁碰撞以及支座失效等震害<sup>[10-11]</sup>。

迄今为止, 研究者在采用减隔震手段来完成基于性能的桥梁抗震设计目标方面取得了一些可观的研究成果, 纵观已有研究成果不难发现, 学者们的研究大多数集中于计算、构造复杂的一些减隔震装置, 且主要针对的是直线桥梁<sup>[12-18]</sup>。

首先, 提出基于支座摩擦滑移隔震的非规则曲线桥梁漂浮抗震体系; 其次, 建立该体系的基本力学模型, 推导其动力方程, 探讨其工作机理; 再次, 运用该体系建立一座相似比为 1/20 的非规则曲线桥梁, 并对其进行不同输入地震波的地震模拟振动台试验研究, 探讨运用该体系设计的非规则曲线桥梁的隔震性能; 最后, 研究运用该体系设计的非规则曲线桥梁的性能破坏模式。通过研究, 以为非规则曲线桥梁抗震设计规范的形成提供依据。

## 1 漂浮抗震体系的提出

非规则曲线桥梁漂浮抗震体系主要由两部分组成, 其中一部分是具有耗能减震能力的滑动支座, 另一部分是防落梁耗能减震措施, 是一种以支座摩擦耗能及滑移隔震为一体的新型结构体系。该体系在地震过程中充分体现了基于性能的抗震设计理念, 采用分级耗能的设计思想, 旨在使桥梁结构在强地

震发生后以耗能减震支座或者减震措施的破坏为代价来确保桥梁结构不产生难以修复的破坏, 地震结束后, 仅需通过局部更换支座或者耗能减震措施等易损部位便可迅速恢复桥梁结构的通行能力。

根据地震重现期(烈度大小)及地震发生的整个过程, 可以将漂浮抗震体系分为 3 个工作阶段: 阶段 1, 常遇地震(小震)时, 梁体、支座、桥墩之间不发生相对运动, 结构处于弹性阶段, 此时输入到结构的能量仅通过结构自身变形消耗。阶段 2, 设防地震(中震)时, 由于支座在未做任何特殊处理的前提下被直接放置于桥墩上部, 当地震力导致支座与桥墩或梁体接触面之间的接触力大于其最大静摩擦力时, 支座开始出现滑动。此时, 不仅接触面间的摩擦可以耗散地震能量, 同时支座滑动后在减小地震力向上部梁体传递的同时也减小上部梁体惯性力向下部桥墩的传递。阶段 3, 罕遇地震(大震)时, 地震力较大使得支座已在桥墩上方无滑动空间, 梁体与桥墩之间的相对位移已超过其初始间距, 梁体与防落梁耗能减震措施发生碰撞, 耗散地震能量。

3 阶段工作简图如图 1 所示。

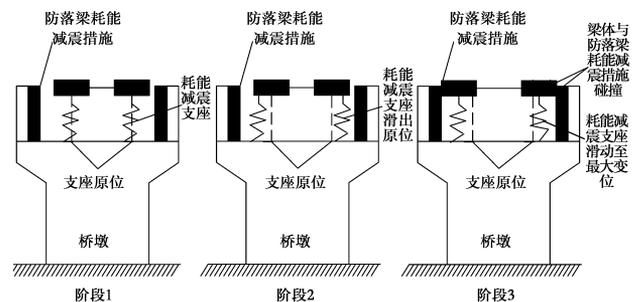


图 1 漂浮抗震体系

Fig. 1 Floating seismic system

## 2 漂浮抗震体系力学简化模型

根据动力学中结构的基本简化方法, 漂浮抗震体系可以简化为两质点体系动力模型。地震力作用下, 上部梁体的水平刚度较大, 变形较小, 其运动状态接近于平动; 同时, 上部梁体水平刚度相比支座水

平刚度来说极大;因而将梁体假定为一单质点是合理的。分析过程中不考虑支座的竖向变形。对于支座下部桥墩,可采用约束条件及刚度与原桥墩完全相同的单质点体系进行等效,并保证单质点体系基频与原体系等效。采用这种简化方式,模型形式简单,且突出了漂浮抗震体系的主要影响参数。简化力学模型如图 2 所示。

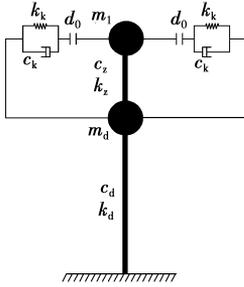


图 2 漂浮抗震体系力学简化模型

Fig. 2 Simplified model of floating seismic system

不考虑结构的非线性变形,漂浮抗震体系的动力方程可以根据支座滑动前及滑动后分为几种状态:

状态 1:支座处于弹性变形阶段,桥墩、支座、梁体变形协调,支座与其接触面间无滑动,梁体与限位装置未发生碰撞。结构计算模型如图 3 所示。

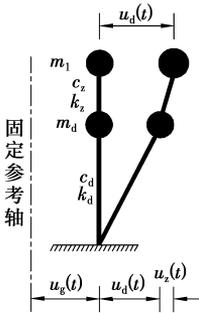


图 3 状态 1 计算模型

Fig. 3 Calculation Model of state 1

根据达朗贝尔原理,状态 1 时结构的动力方程为

$$\begin{cases} m_d \ddot{u}_d(t) + c_d \dot{u}_d(t) + k_d u_d(t) - \\ c_z \dot{u}_z(t) - k_z u_z(t) = -m_d \ddot{u}_g(t) \\ m_1 [\ddot{u}_d(t) + \ddot{u}_z(t)] + c_z \dot{u}_z(t) + \\ k_z u_z(t) = -m_1 \ddot{u}_g(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \$m\_d\$、\$m\_1\$ 分别为桥墩和上部梁体的等效质量; \$k\_d\$、\$k\_z\$ 分别为桥墩的等效刚度、支座的水平刚度; \$c\_d\$、\$c\_z\$ 分

别为桥墩的等效阻尼、支座阻尼; \$u\_d(t)\$、\$u\_1(t)\$、\$u\_z(t)\$、\$u\_g(t)\$ 分别为桥墩相对于基础的位移、支座的剪切变形、梁体相对于基础的位移、基础承受的水平地震地面运动。

状态 2:支座顶面与其接触面发生滑动,梁体与限位装置未发生碰撞。结构计算模型如图 4 所示。

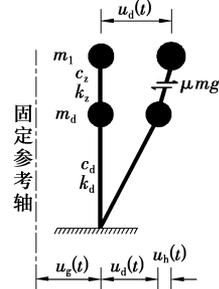


图 4 状态 2 计算模型

Fig. 4 Calculation Model of state 2

状态 2 时,结构的动力平衡方程为

$$\begin{cases} m_d \ddot{u}_d(t) + k_d u_d(t) + c_d \dot{u}_d(t) - F_c = -m_d \ddot{u}_g(t) \\ m_1 [\ddot{u}_d(t) + \ddot{u}_h(t)] + F_c = -m_1 \ddot{u}_g(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$m\_d\$、\$m\_1\$、\$k\_d\$、\$u\_d(t)\$、\$u\_1(t)\$、\$u\_g(t)\$ 同状态一; \$u\_h(t)\$ 为梁体在支座上方滑动的位移; \$F\_c\$ 为梁体与支座之间的动摩擦力,其数值及方向大小随梁体与桥墩之间的相对位移量变化,具体情况如式(3)所示。

$$F_c = \begin{cases} -\mu mg & u_1(t) - u_d(t) > 0 \\ \mu mg & u_1(t) - u_d(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

状态 3:梁体位移过大,梁体与限位装置之间的相对位移超过梁体与限位装置之间的初始间距后发生接触碰撞。结构计算模型如图 5 所示。

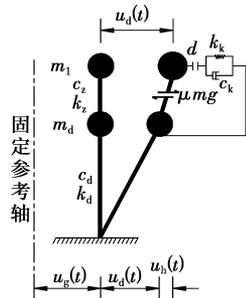


图 5 状态 3 计算模型

Fig. 5 Calculation Model of state 3

状态 3 时,结构的动力平衡方程为

$$\begin{cases} m_d \ddot{u}_d(t) + k_d u_d(t) + c_d \dot{u}_d(t) - F_c - k_k [u_1(t) - u_d(t) - d_0] - c_k [\dot{u}_1(t) - \dot{u}_d(t)] = -m_d \ddot{u}_g(t) \\ m_1 \ddot{u}_d(t) + m_1 \ddot{u}_h(t) + F_c + k_k [u_1(t) - u_d(t) - d_0] + c_k [\dot{u}_1(t) - \dot{u}_d(t)] = -m_1 \ddot{u}_g(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $k_k$ 为梁体与限位装置的接触碰撞刚度； $c_k$ 为碰撞单元的阻尼； $d_0$ 为梁体与限位装置之间的初始间隙；其余符号均同状态 1、状态 2。

以上各式即为漂浮抗震体系的不同状态的动力方程，通过对方程求解即可确定桥梁结构主梁、墩顶等特征点的位移、加速度等响应值。

### 3 漂浮抗震体系隔震性能试验研究

基于漂浮抗震体系的基本原理，设计一座相似比为 1/20 的非规则曲线桥梁，并对其进行地震模拟振动台试验，用以验证漂浮抗震体系理论的正确性。

#### 3.1 试验设计

1)相似关系。动力相似在模型结构振动台试验过程中起着决定性作用，即一般要求满足式(5)。

$$\frac{S_E}{S_l S_\rho S_a} = 1 \quad (5)$$

式中： $S_l$ 、 $S_E$ 、 $S_\rho$ 、 $S_a$ 分别为模型结构的几何、弹模、质量密度以及加速度相似比。

结合试验目的、西安建筑科技大学振动台具体参数以及施工技术等方面的因素，根据相似关系，推导主要相似常数如表 1。

表 1 主要相似常数

Table 1 List of main similar constants

物理参数	相似符号	相似常数
长度	$S_l$	0.050
弹性模量	$S_E$	0.638
质量密度	$S_\rho$	5.100
加速度	$S_a$	2.500

2)模型材料。模型材料选用陶粒混凝土与钢筋，利用强度 C25 的陶粒混凝土结构来模拟实际强度 C50 的混凝土桥梁结构，使用  $\Phi 6$  mm 的 HRB335 级带肋钢筋作为箱梁和桥墩的纵向钢筋，箱梁和桥墩的箍筋均采用  $\Phi 6$  mm HPB300 级光圆钢筋，间距按照 6 cm 布置。

经最终试验确定，试验材料陶粒混凝土的弹性模量  $2.2 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>，强度等级达到 C25；钢材屈服强度为 348 MPa，满足试验要求。

3)模型尺寸。模型长 3 685 mm，桥墩高 1 555 mm，主梁高 100 mm。模型设计尺寸如图 6 所示。

4)配重。由于模型缩尺及使用陶粒混凝土的原因，制作的模型不能满足质量相似比，按照目前振动台试验的一般解决办法，为模型进行配重。配重过

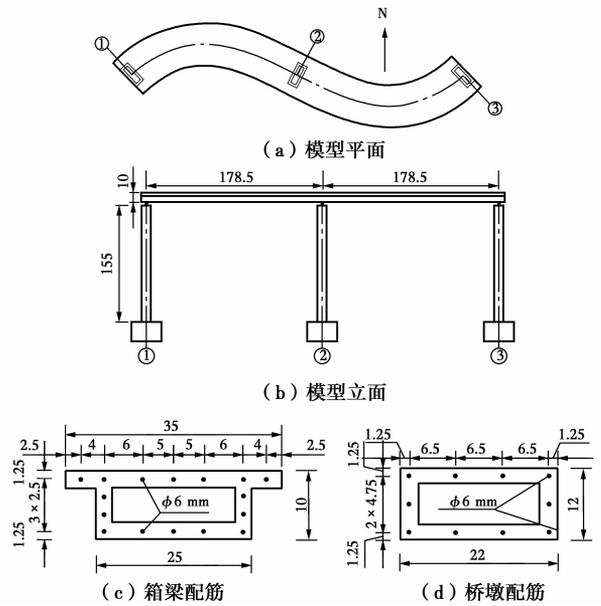


图 6 模型设计(单位:cm)

Fig. 6 Design of model

程中为尽量解决不均匀配重问题，课题组成员在模型桥墩和梁体上均进行了配重，经计算配重率达到 80% 以上，施加配重后的模型如图 7 所示。

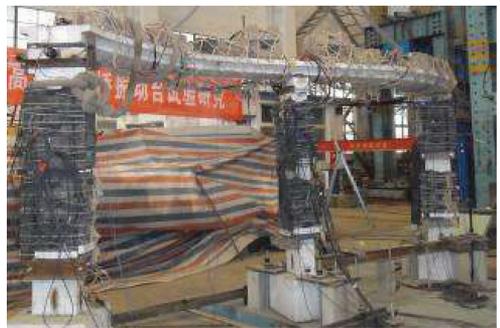


图 7 模型配重

Fig. 7 Model weight

5)测点布置。模型共布置 2 个加速度传感器，分别布置在 1<sup>#</sup>墩墩底和墩顶的切向方向；共布置 4 个位移传感器，分别布置在 2<sup>#</sup>墩墩顶及其上部桥面的径、切向。

6)地震波的选取。为探讨采用漂浮抗震体系进行隔震设计的非规则曲线桥梁的工作性能和隔震效率，试验模型分别采用 Imperial valleyive、Taft、El-Centro、及 LZ(兰州)波作为输入地震波，研究地震输入加速度峰值为 0.25~1g 时，漂浮抗震体系的地震响应规律，各地震波参数如表 2 所示，时程曲线及傅里叶谱如图 8~11 所示。分析模型沿 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>墩方向为结构的弱轴方向，故地震波的方向为 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>墩的连线方向。

表 2 地震波参数

Tab. 2 Parameters of earthquake waves

地震波	时间	台站	持时/s	PGA/g	PGV/(m·s <sup>-1</sup> )
Imperial valleyive 波	1979-10-15	Sup-Superstition mountain, CA, Station USGS 0286	28.36	0.182	8.045
Taft 波	1952-07-21	Kern County, California earthquake, Station 095	30.00	0.176	17.545
El-Centro 波	1940-05-18	El Centro California	30.00	0.341	38.126
LZ 波	人工波		20.00	0.185	11.710

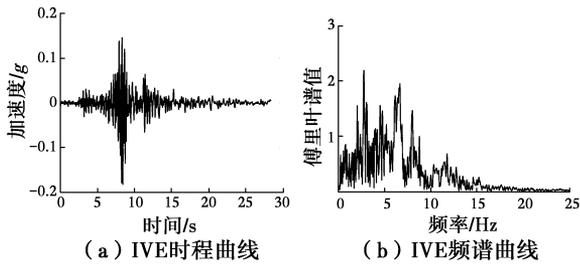


图 8 Imperial valleyive 波  
Fig. 8 Imperial valleyive earthquake wave

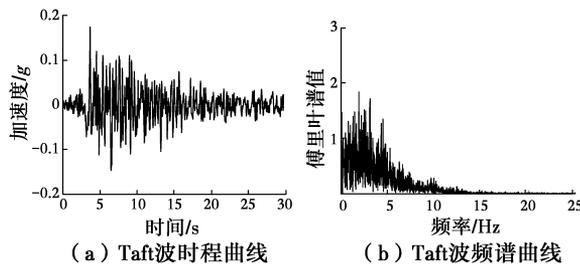


图 9 Taft 波  
Fig. 9 Taft earthquake wave

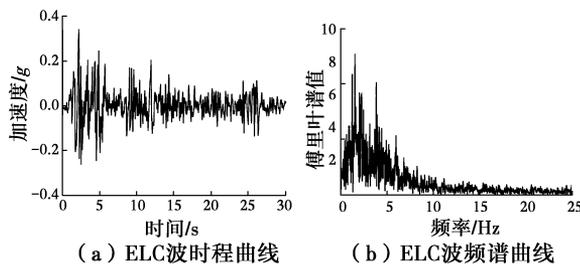


图 10 El-centro earthquake wave  
Fig. 10 El-centro earthquake wave

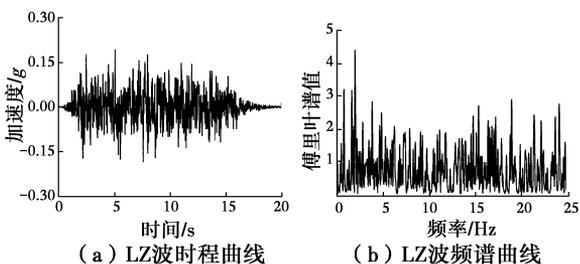


图 11 LZ 波  
Fig. 11 LZ earthquake wave

图 12 为地震波输入加速度峰值为 0.25g 时的 1<sup>#</sup>墩顶及其上部梁体的切向加速度时程曲线。

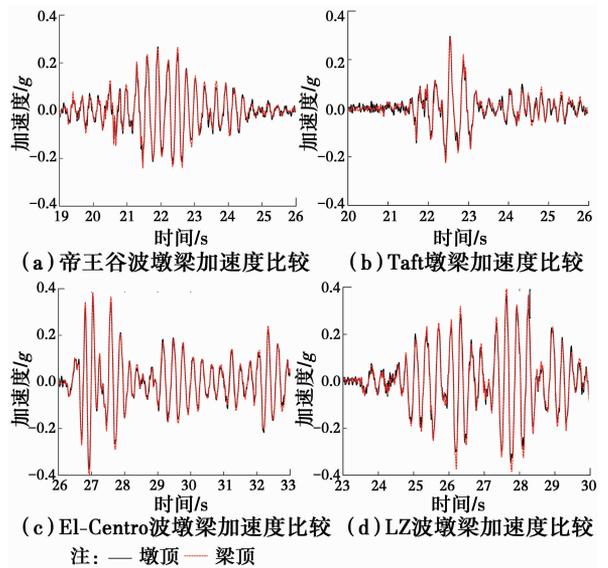


图 12 墩梁加速度比较(0.25g)

Fig. 12 Acceleration comparison of pier and beam (0.25g)

从以上分析可知,地震波加速度峰值较小时,梁顶相对于墩顶的加速度峰值均有不同程度的增加,此结果说明橡胶支座与桥墩、梁体协调运动,地震作用下通过橡胶支座对墩顶传递到梁顶的加速度有放大效应。此试验结果与漂浮抗震体系中的状态一相符合。

2)0.75g 地震波作用下隔振性能研究

图 13 为地震波输入加速度峰值为 0.75g 时, 1<sup>#</sup>墩顶及其上部梁体的切向加速度时程曲线。

从图 13 中分析可以知:地震烈度较大时,梁体的加速度峰值同墩顶相比均有不同程度的降低,此结果反应出支座的耗能减震作用非常明显。

为进一步说明耗能减震的效果,作者将图 13 峰值进行提取对比,比较墩顶与梁顶加速度峰值说明滑动支座耗能减震能力的大小,如图 14 所示。

从以上结果可以看出:4 种地震波输入时,将桥面加速度峰值相比墩顶,均有不同程度降低,分别减小 32%、32%、62%、65%。罕遇地震作用下,桥梁结构的支座摩擦滑移现象明显,消耗了大量的地震

3.2 试验结果分析

1)0.25g 地震波作用下隔震性能研究

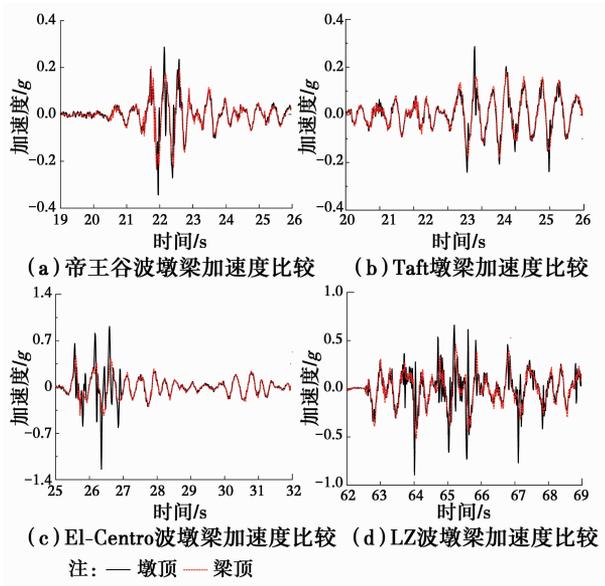


图 13 墩梁加速度比较 (0.75g)

Fig. 13 Acceleration comparison of pier and beam (0.75g)

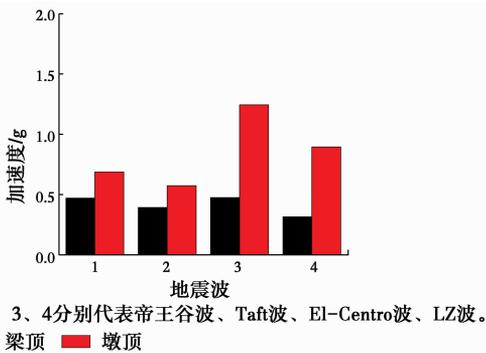


图 14 墩梁加速度峰值

Fig. 14 Peak acceleration of pier and beam

能量,桥梁未出现严重损伤。通过应变数据分析也证明了,即使在罕遇地震作用下桥墩钢筋上应变数值仍在弹性范围内,说明采用漂浮抗震体进行设计的非规则曲线桥梁具有良好的抗震性能,因而为非规则曲线桥梁采用漂浮抗震体系提供了依据。试验结果与漂浮抗震体系中的状态 2、3 相符合。

### 3.3 防落梁限位装置分析

采用 El-Centro 波作用下,地震波输入加速度峰值分别为 0.25g、0.375g、0.5g、0.75g、1g 时 2# 墩及其上方梁体位移情况进行分析,如图 15 所示。

通过对图 15 分析,发现随着地震烈度的增加,试验桥梁的径、切向位移也逐渐增加。若梁体与桥墩之间的相对位移一旦超过梁体与限位装置之间的初始间距,梁体将与限位装置之间发生碰撞或者产生落梁震害,因此限位装置的设置防止落梁震害发生上非常有必要。

在实际桥梁中,一个桥墩的盖梁上方承受梁体

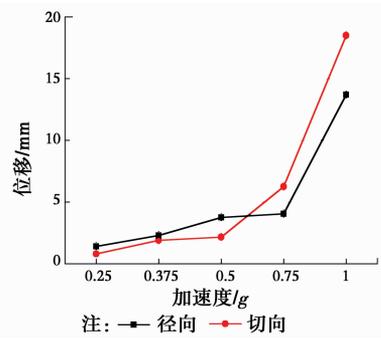


图 15 2# 墩墩梁相对位移

Fig. 15 Relative displacement of pier #2 and the beam

横向滑动冲击的只有一个挡块,当遇到大震作用时,往往出现单个挡块受力过大而产生挡块开裂等震害现象。为了防止这种现象的发生并最大限度使用两侧挡块共同承受梁体的撞击,课题组设计出一种改进后的非规则桥梁横向限位挡块,即将梁体与两侧挡块通过预先定制好的弹簧减震橡胶组合结构(见图 16、图 17)连接起来。这种装置在无地震作用时,弹簧处于自由伸长阶段,弹簧上无力的作用。当梁体横桥向移动时,超过弹簧的自由长度后,一侧弹簧压缩,另一侧弹簧拉伸,即梁体撞向一侧挡块的同时,另一侧挡块上的弹簧开始起出现拉力,如此这样便形成了一个双重防落梁保护措施。桥梁纵向的限位措施如图 18 所示,其也是通过具有自由长度的弹簧与减震材料组合而成(图 18),当梁体向跨中侧运动,弹簧超过自由长度时,出现拉力,防止落梁;当梁体向桥墩侧运动时,弹簧超过自由长度后,梁体便与预先设定的耗能减震材料发生碰撞,耗散地震能量,阻止梁体继续运动。因此,弹簧-减震材料组合构件可以起到纵、横向的防落梁。

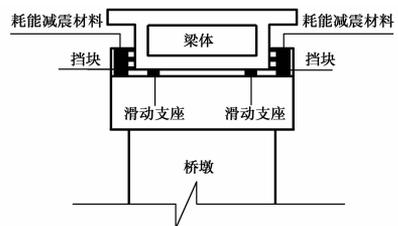


图 16 横向限位装置

Fig. 16 Transverse limiting device

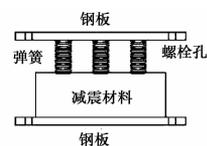


图 17 弹簧-减震材料组合构件

Fig. 17 Composite component spring shock absorbing material

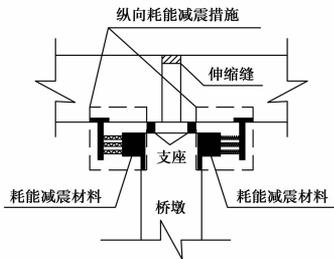


图 18 纵向限位装置

Fig. 18 Longitudinal limiting device

### 3.4 基于漂浮抗震体系的非规则曲线桥梁性能破坏模式研究

“多道设防、分级耗能”的设防理念是各国桥梁结构基于性能的抗震规范的发展方向,对于非规则桥梁来说,可以运用板式橡胶支座的摩擦滑移特性,结合限位装置共同使用,限制其产生较大位移,允许支座或者限位装置等牺牲性原件的损伤来避免过大地震力传递给桥墩,并同时设置合理的防落梁长度,避免落梁震害。对考虑板式橡胶支座摩擦滑移的非规则桥梁在纵、横向上均采用“弹簧-耗能减震材料组合构件”的设计方法,针对常遇地震(小震)、设防地震(中震)及罕遇地震(大震),分为以下几种破坏模式:

常遇地震时,支座发生弹性变形或发生较小的滑移,不影响使用要求,限位装置与上部结构件有足够的间距允许梁体滑动,且梁体滑动后不与限位装置发生碰撞。

设防地震时,支座受水平力过大后,发生摩擦滑移,梁体与限位装置碰撞耗能,减小下部结构受力,进而使得下部结构保持为弹性或者低损伤状态。

罕遇地震时,支座损伤严重防落梁耗能减震措施损伤严重,限位装置发挥作用,允许桥墩底部进入部分延性,但必须保证上部结构与下部结构具有足够的防落梁长度,严防落梁震害发生。

## 4 结论

提出了非规则曲线桥梁漂浮抗震体系的基本概念,建立该体系的基本力学模型,推导其动力方程。通过振动台试验结果验证了漂浮抗震体系的合理性,分析了该体系应用过程中限位装置的重要性,对该体系下非规则桥梁的破坏模式进行了研究。

1)非规则曲线桥梁漂浮抗震体系概念清晰、力学模型准确,工作机理可靠明确,抗震试验效果显著,性能破坏模式正确,完全适用于非规则曲线桥梁的抗震设计。

2)非规则曲线桥梁在应用漂浮抗震体系进行抗

震设计时,当支座滑动前,支座对墩顶传入梁体的地震波有一个放大效应;当支座进入滑动状态后,梁体相对墩顶的加速度响应均有较大减小,故支座滑动后,其隔震效果显著。

3)常遇地震作用下,支座受力较小,基本不滑移,依靠结构本身变形耗能;设防地震发生后,支座摩擦滑移隔震作用有助于减小桥梁结构的损伤程度;罕遇地震发生后,摩擦耗能、滑移隔震、防落梁耗能减震措施协同工作,避免桥梁倒塌,充分体现了其符合基于性能的抗震设计理念。

4)应用漂浮抗震体系后,非规则曲线桥梁在地震过程中支座、耗能减震挡块等牺牲性原件损伤严重,但桥墩损伤较小,仅需通过简单更换支座或耗能减震挡块便可快速恢复桥梁的运营能力,同时大大减小损失,提高救灾效率。

### 参考文献:

- [1] AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design: AASHTO 2007 [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [2] PRIESTLY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic design and retrofit of bridges [M]. New York: John Wiley and Sons, 1996: 12-29.
- [3] MITCHELL D, BRUNEAU M, WILLIAMS M, et al. Performance of bridges in the 1994 northridge earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 415-427.
- [4] 赵国辉,刘健新.汶川地震桥梁震害分析及抗震设计启示[J].震灾防御技术,2008,12(4):363-369.  
ZHAO G H, LIU J X. Seismic damage analysis and seismic design of bridges in Wenchuan earthquake [J]. Earthquake Disaster Prevention Technology, 2008, 12(4): 363-369. (in Chinese)
- [5] 王秋萍.汶川地震桥梁震害模糊综合评估方法研究[D].成都:西南交通大学,2011.  
WANG Q P. Fuzzy comprehensive evaluation method of bridge damage in Wenchuan earthquake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [6] 王克海,韦韩,李茜,等.中小跨径公路桥梁抗震设计理念[J].土木工程学报,2012,45(9):115-121.  
WANG K H, WEI H, LI Q, et al. Seismic design concept for medium and small span highway bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 115-121. (in Chinese)
- [7] 王克海,李冲,李茜,等.考虑支座摩擦滑移的中小跨径桥梁抗震设计方法[J].工程力学,2014,31(6):85-92.  
WANG K H, LI C, LI Q, et al. Seismic design

- method of small and medium span bridge considering bearing friction slipping[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(6):85-92. (in Chinese)
- [8] 王东升,孙治国,郭迅. 汶川地震桥梁震害经验及抗震研究若干新进展[J]. *公路交通科技*, 2011, 28(10): 44-53.  
WANG D S, SUN Z G, GUO X. Some new advances in seismic damage of bridges in the earthquake of Wenchuan and some new advances in seismic research [J]. *Highway Traffic Science and Technology*, 2011, 28(10):44-53. (in Chinese)
- [9] 宋飞, 李建中, 管仲国. 汶川地震百花大桥震害分析 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(8):121-128.  
SONG F, LI J Z, GUAN Z G. Earthquake damage analysis of Baihua bridge in Wenchuan earthquake [J]. *Vibration and Shock*, 2015, 34 (8): 121-128. (in Chinese)
- [10] 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.  
WANG K H, SUN Y H, WEI H, et al. Some thoughts on the seismic design of structure engineering in Wenchuan after the earthquake of [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(11):54-59. (in Chinese)
- [11] 林庆利, 林均岐, 刘金龙. 汶川地震公路桥梁易损性研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(4): 110-126.  
LIN Q L, LIN J Q, LIU J L. A study on the fragility of high way bridges in the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36 (4): 110-126. (in Chinese)
- [12] 王常峰, 陈兴冲, 朱春林, 等. 考虑支座及限位装置非线性的接触摩擦单元模型[J]. *工程力学*, 2013, 23(8): 186-192. (in Chinese)  
WANG C F, CHEN X C, ZHU C L, et al. A model of the contact friction element considering the nonlinearity of the support and the limit device [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 23 (8):186-192. (in Chinese)
- [13] DALL A A, RAGNIB L. Nonlinear behavior of dynamic systems with high damping rubber devices [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30 (12): 3610-3618.
- [14] XING C X, WANG H, LI A Q. Design and experimental verification of a new multi-functional bridge seismic isolation bearings[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2012, 13(12) : 904-914.
- [15] SIQUEIRA G H, SANDA A S, PAULTRE P, et al. Fragility curves for isolated bridges in eastern Canada using experimental results [J]. *Engineering Structures*, 2014, 74(9):311-324.
- [16] 燕斌, 杜修力, 韩强, 等. 防落梁板式橡胶支座抗震性能分析 [J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(6): 857-864.  
YAN B, DU X L, HAN Q, et al. Anti seismic performance of beamfalling plate rubber bearing analysis [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(6):857-864. (in Chinese)
- [17] 汤虎, 李建中, 邵长宇. 板式橡胶支座梁桥横向抗震加固研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 1(4):33-41.  
TANG H, LI J Z, SHAO C Y. Study on lateral seismic strengthening of slab supported beam bridge [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 1(4):33-41. (in Chinese)
- [18] 汤虎, 李建中, 邵长宇. 中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震性能[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(3):55-65.  
TANG H, LI J Z, SHAO C Y. Transverse seismic behavior of medium and small span slab supported beam bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(3):55-65. (in Chinese)

(编辑 胡玲)