

# 采用拉索支座的桥梁振动台试验

杨浩林, 田圣泽, 庞于涛, 袁万城

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 以南昌朝阳大桥为背景, 设计了半结构振动台模型试验, 介绍了模型设计的过程. 根据桥梁是否采用拉索支座, 将模型分为拉索支座体系与摩擦支座体系两种, 选取了南昌朝阳大桥场地人工波与 El Centro 地震波进行两种体系下模型振动台试验加载. 分析了各工况下结构关键位置的响应, 分析解释了拉索支座限位原理. 结果表明, 在地震作用下, 墩梁位移响应较小时, 拉索支座具备与普通摩擦支座相似的减震特性; 而在墩梁位移响应较大时, 拉索支座通过为主梁提供瞬时加速度, 控制墩梁位移, 限制其进一步增加.

**关键词:** 桥梁; 抗震设计; 减隔震设计; 振动台试验; 拉索减震支座

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

## Shaking Table Test of a Bridge with Cable-sliding Isolation Bearing

YANG Haolin, TIAN Shengze, PANG Yutao, YUAN Wancheng  
(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A half-structure shaking table test based on Nanchang Chaoyang Bridge was designed and a detailed introduction of the designing process was performed. Two types of isolated system, i. e., cable-sliding bearing system and friction bearing system, were introduced and applied to the structure according to whether or not cable-sliding bearings were used. Two sets of seismic wave including the Nanchang artificial wave and El Centro seismic wave were induced as seismic loads during the test. The peak seismic responses of each key node of the structure were analyzed, so were the principle of how the cables could restrict the relative displacement between girder and piers. The results show that, under the seismic load, when the relative displacement response between girder and pier is small, cable-sliding bearings have similar isolation features with ordinary sliding bearings. When the relative displacement is large, the cables

can provide a momentary acceleration to the girder which can help limit the relative displacement and restrict it from increasing.

**Key words:** bridge; seismic design; isolation design; shaking table test; cable-sliding isolation bearing

在现行的各种桥梁抗震设计方法中, 支座减隔震设计由于其良好的减隔震效果与震后易更换修复的特性, 自其诞生以来就被全世界桥梁工作者所广泛采用<sup>[1]</sup>, 也正被国内越来越多的桥梁工作者所采用. 但进行支座减隔震设计的桥梁最易发生且最为严重的震害之一是由于主梁与桥墩之间相对位移过大, 超过了支座变形或位移能力极限之后发生的落梁.

为了防止这种灾害, 国内外多家研究机构与多名专家学者展开了广泛的研究. Zayas 等<sup>[2]</sup>曾提出了具有自复位功能的摩擦摆支座. George 等<sup>[3]</sup>提出了具有自复位功能的滚筒式支座并进行了拟静力试验. Reginald 等<sup>[4]</sup>提出了采用拉索限制墩梁位移的方法并对其进行了桥梁足尺拟静力试验. 国内李建中等<sup>[5]</sup>提出了自复位双曲面球型减隔震支座并对其展开了一系列研究. 袁万城等<sup>[6]</sup>提出了在传统减隔震支座上下板之间添加拉索限制相对位移, 并由此开发出了拉索减隔震支座. 其中拉索减隔震支座由于其简单有效的构造以及可以与多种支座相结合共同使用的特性, 在国内的大小工程中都有所应用, 其中包括江西南昌朝阳大桥, 但到目前为止, 该支座还没有经过振动台试验的考验.

振动台试验由于其可以较好地再现地震过程, 使其成为研究结构地震破坏机理以及抗震措施有效性最为直接有效的方法, 一直以来也得到结构抗震

收稿日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51478339, 51278376, 91315301); 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE14-B-14); 江西省科技计划(20151BBG70064)

第一作者: 杨浩林(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁设计与桥梁抗震防灾. E-mail: 88haolinyang@tongji.edu.cn

通讯作者: 袁万城(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构振动与抗震. E-mail: yuan@tongji.edu.cn

工作者的青睐与广泛应用. 闫聚考等<sup>[7]</sup>以泰州长江大桥为背景,通过 1/40 缩尺比振动台试验研究了三塔悬索桥的地震响应特性,对比了多种抗震体系的异同. 周敦等<sup>[8]</sup>通过 1/60 缩尺比振动台试验与有限元模拟相结合的方法,对猎德大桥的抗震性能进行了研究. Padgett 等<sup>[9]</sup>进行了 1/4 缩尺比的采用记忆金属限位器的混凝土梁桥振动台试验,并采用有限元方法进行了试验仿真与拓展研究. Cheng<sup>[10]</sup>对一个具有自复位功能的桥墩结构进行了理论分析与振动台试验,研究了摇摆桥墩的抗震机理.

本文以南昌朝阳大桥为背景,在同济大学地震工程馆多功能 4 台联动振动台进行了半桥振动台试

验研究,研究的重点是验证拉索支座的减震限位效果,并分析拉索限位原理.

## 1 试验模型

### 1.1 总体布置

南昌朝阳大桥主桥跨径布置为 79 m+5×150 m+79 m=908 m,主桥采用对称布置 6 塔矮塔斜拉桥,塔梁固结,塔墩分离. 主梁波形钢腹板 PC 组合箱梁,承台以上平均塔高 74 m,桥塔、桥墩及承台基础部分均为混凝土材料,如图 1 所示.

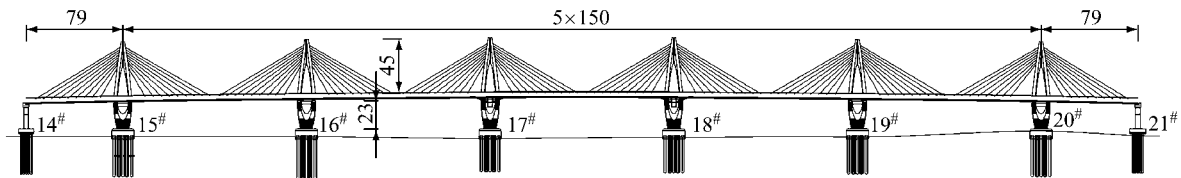


图 1 朝阳大桥(单位:m)

Fig.1 Chaoyang Bridge(unit: m)

朝阳大桥主桥全桥较长,主塔较多,如果将边跨桥墩也计算在内,总共有 8 个独立桥墩需要与振动台连接,由于主桥为对称结构,且本文的主要研究目的是借助桥梁振动台试验研究拉索支座限位原理,

综合考虑试验模型特点与实验室条件,最终将模型设计为 3 塔半桥试验,边墩(14#)以及 3 个主墩(15#,16#及 17#)分别布置在 4 个独立振动台上,主桥跨中位置布置边界条件,如图 2 所示.

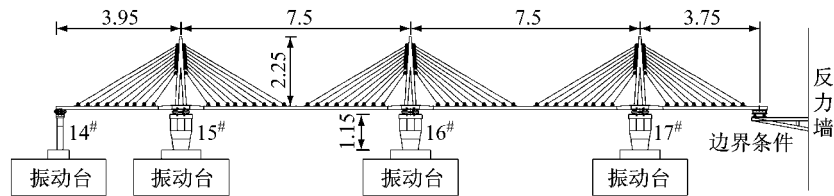


图 2 朝阳大桥振动台模型(单位:m)

Fig.2 Shakingtable test model of Chaoyang Bridge(unit: m)

### 1.2 模型参数

模型设计选取几何相似比、弹性模量相似比和加速度相似比作为模型设计控制参数,其余物理量相似比均可根据上述 3 种相似比通过量纲分析得到. 表 1 列出了模型各物理量相似比.

模型桥墩材料采用微粒混凝土. 选择原桥主墩 5 个关键截面作为控制截面,截面尺寸按照几何相似比 1/20 进行缩尺设计,控制截面之间则以直代曲进行连接,边墩同理. 原桥桥塔与主梁需要固结,出于模型加工以及后期模型安装方便程度考虑,主梁与桥塔部分采用钢材代替. 但由于采用钢材以后,材料弹性模量不满足相似比要求,故采用相应截面抗弯刚度等效原则进行设计. 设计完成的桥墩,主梁与桥

表 1 模型相似比

Tab.1 Similarity ratio of model

物理量	相似比	物理量	相似比
长度 $l$	0.05	加速度 $a$	2
面积 $S$	0.002 5	质量 $m$	0.000 375
位移 $\delta$	0.05	刚度 $k$	0.015
转角 $\theta$	1	时间 $t$	0.158 113 883
弹性模量 $E$	0.3	频率 $f$	6.324 555 32
应变 $\epsilon$	1	阻尼 $c$	0.002 371 708
应力 $\sigma$	0.3	速度 $v$	0.316 227 766
泊松比 $\mu$	1	力 $F$	0.000 75
密度 $\rho$	3	弯矩 $M$	0.000 037 5

塔尺寸如图 3 所示. 塔梁间的斜拉索采用钢丝绳模拟,并串联力传感器与花篮螺栓,通过调节花篮螺栓的松紧程度来控制斜拉索的索力.

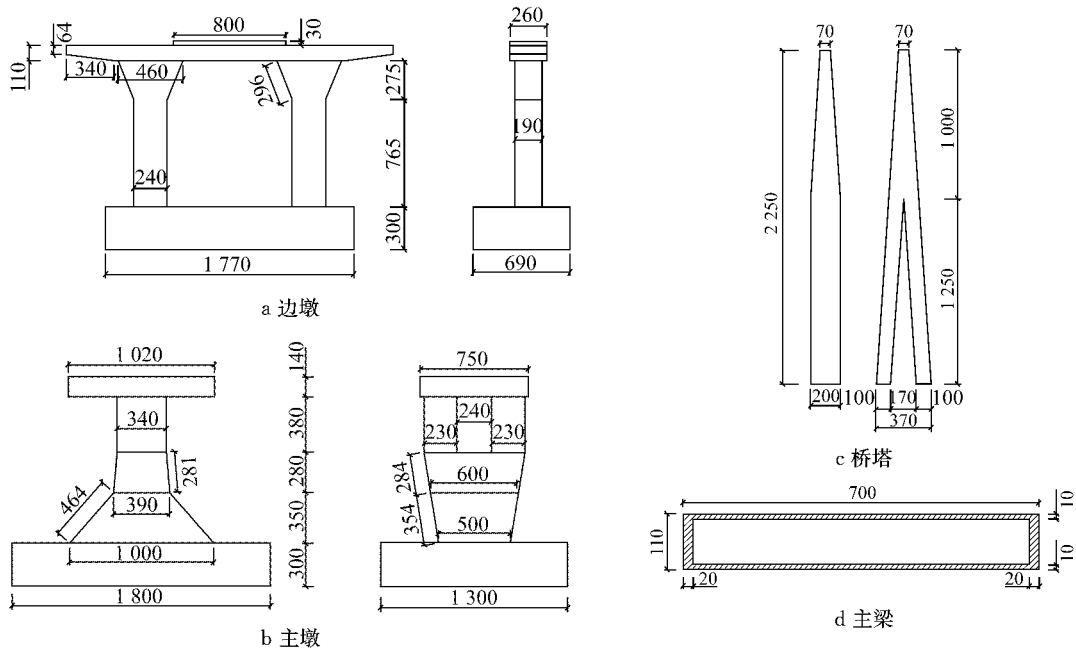


图 3 模型细部尺寸(单位:mm)

Fig.3 Detailed dimensions of test model(unit: mm)

在振动台试验中,结构本身惯性力在试验过程中至关重要,为了满足模型质量相似比,需要在模型基础上配重.配重的方法为,根据相似比计算出试验模型的理论质量,根据试验模型尺寸以及所选材料计算出试验模型实际质量,两者的差值即为配重质量.模型各部位配重质量如表 2 所示.

表 2 模型配重表

Tab.2 Additional weight of test model t

配重位置	主梁	桥塔	边墩	主墩
配重质量	17.396	0.784	0.869	2.207

本试验为半桥试验,需要在跨中位置赋予结构边界条件装置.安装完成后的边界条件装置如图 4 所示.



图 4 边界条件装置

Fig.4 Device of boundary condition

### 1.3 拉索支座

拉索支座的基本原理是在常规摩擦型减隔震支座的基础上,在支座上下板之间增设拉索,正常使用状况下,拉索处于松弛状态,支座上下板相对位移达到设计值(通常称为自由程)时,拉索绷紧,限制支座

相对位移的进一步增大,拉索具体长度由支座本身尺寸与自由程的几何关系与计算得到<sup>[6]</sup>.

朝阳大桥使用的拉索支座是在普通球钢支座顶板与底板间增加拉索改造而成,支座摩擦接触面为四氟板与镜面不锈钢.在此实桥支座的基础上,设计了 20 t 与 10 t 两种吨位的试验用支座,在各个桥墩顶关于主梁中轴线对称布置 2 座试验支座,边墩支座吨位为 10 t,主墩支座吨位为 20 t,其中 15# 墩顶支座带拉索装置,支座自由程 18 mm,其余支座不带拉索,所有支座位移能力为 55 mm(即支座相对位移超过 55 mm 时四氟板外侧边缘滑出镜面不锈钢外侧边缘).主墩安装完成的试验用拉索支座如图 5 所示.安装完成后的试验模型如图 6 所示.

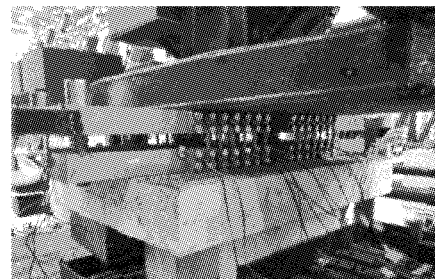


图 5 模型拉索支座

Fig.5 Cable-sliding bearing for test model

## 2 试验工况

### 2.1 试验体系

由于本试验的主要目的是观察并研究桥梁在使



图 6 朝阳大桥振动台模型

Fig.6 Test model for Chaoyang Bridge

用拉索支座与普通摩擦支座两种不同支座的情况下,结构整体在地震动作用下各部分响应的异同,故按是否采用拉索支座将结构体系分为拉索支座体系与摩擦支座体系。

在试验中,实现两种体系间相互转化的方法是:首先将拉索安装在支座上,搭建拉索支座体系试验模型并完成计划中所有该体系下的工况;之后采用工具将拉索割断,完成拉索支座体系到摩擦支座体系的转化;最后完成摩擦支座体系下所有的工况。

### 2.2 地震动选取

本次试验台面加载选取了一条人工地震波(南昌波)与一条实际地震记录(El Centro 波)。

南昌波是南昌市朝阳大桥工程地震安全性评价报告提供的对应于该大桥 E2 设防水准(50 年超越概率 2%)的人工地震波,地震动 PGA(peak ground acceleration,地震加速度峰值)为 0.131g。El Centro 地震波为 1940 年美国加州帝王谷地震中所测得的地震动时程,地震动 PGA 为 0.313g。试验中按照模型相似比对地震波进行处理,并根据工况设计对地震动 PGA 进行调整,处理并调整 PGA 至 0.1g 的两条地震动加速度时程与加速度反应谱如图 7 和图 8 所示。由图 8 可以看到,南昌波在长周期部分加速度谱值明显高于 El Centro 波。地震动由左向右加载,即以 14#墩指向 17#墩的方向为正方向加载。

### 2.3 工况设计

根据试验模型的体系设计与试验的地震动选取设计,试验采用的工况如表 3 所示。其中白噪声工况主要用以监测结构在各工况作用后结构刚度变化,用以判断结构是否发生了损伤或者任何程度的刚度退化。各实际工况加载完毕后,结构刚度没有退化。在拉索支座体系下,加载各地震波由 PGA 0.1g 开始加载,每次加载完成后检查结构残余位移,并将结构复位,将地震动 PGA 翻倍后继续加载,直至 PGA 达到 0.8g。在摩擦支座体系下,由于 El Centro 波产生的墩梁相对位移较小,故可将其同样加载到 0.8g;

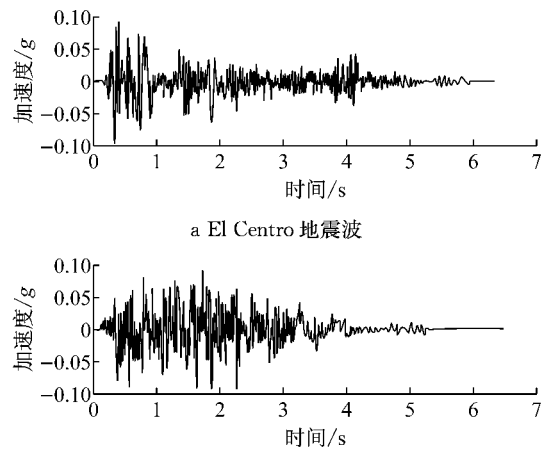


图 7 地震波加速度时程

Fig.7 Time-history of modified seismic waves

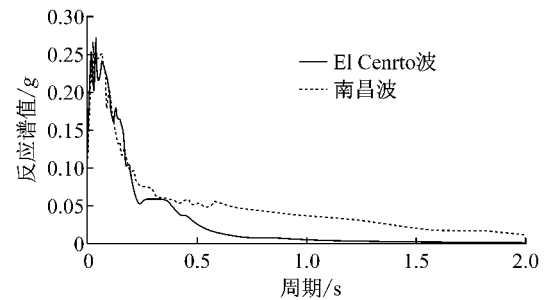


图 8 地震波加速度反应谱

Fig.8 Acceleration response spectra of modified seismic waves

表 3 试验工况

Tab.3 Test protocol

试验体系	输入波形	控制 PGA	试验体系	输入波形	控制 PGA
拉索 支座 体系	白噪声	0.05g	摩擦 支座 体系	白噪声	0.05g
		0.1g			0.1g
	El Centro 波	0.2g		El Centro 波	0.2g
		0.4g			0.4g
		0.8g			0.8g
		0.8g			0.8g
	白噪声	0.05g	南昌波	白噪声	0.05g
		0.1g			0.1g
	南昌波	0.2g		南昌波	0.2g
		0.4g			0.4g
	0.8g		0.8g		

而南昌波则由于产生的墩梁相对位移较大,在 PGA 0.4g 时已经接近支座的安全位移极限,出于试验安全考虑,停止南昌波工况序列 PGA 的进一步增大。

## 3 地震响应分析

### 3.1 响应峰值分析

图 9 为试验中各个工况作用下桥墩与主梁实测

相对位移峰值. 图中 A 代表拉索支座体系, B 代表摩擦支座体系. 在 El Centro 地震波各工况下, 墩梁相对位移均非常小, 大部分都维持在 5 mm 以下, 且体系之间差距也非常小. 在南昌波各工况下, 特别是 PGA 较大的工况中, 两种体系间墩梁位移差距较大, 拉索支座体系位移明显小于摩擦支座体系. 在 0.4g 工况时, 摩擦支座体系支座位移已经接近支座的安全位移极限, 不能继续增加 PGA, 而拉索支座体系则继续加载至了 0.8g 的工况.

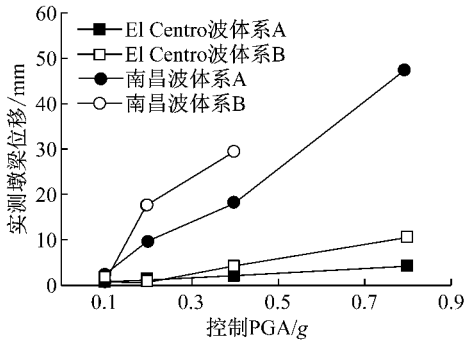


图 9 各工况墩梁相对位移峰值

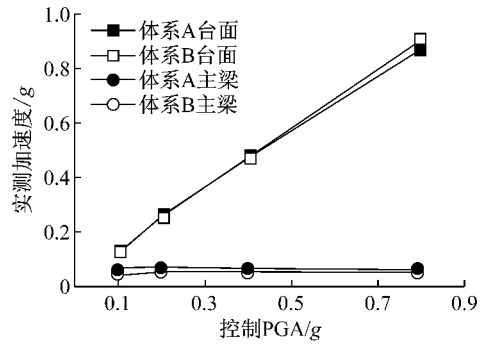
Fig.9 Peak response of girder-pier relative displacement

图 10 为试验中各个工况作用下振动台面与主梁实测加速度峰值. 从图中可以看到, 各个工况下台面实测加速度峰值均与控制 PGA 相差不大, 说明本试验中台面的输入控制较为成功. 在 El Centro 地震波各工况作用下, 主梁的加速度峰值均处在 0.05g 上下, 说明两种体系隔震效率都非常高. 摩擦支座上添加拉索之后, 在该地震波作用下, 支座的隔震效率并不会降低. 在南昌地震波 0.4g 及以下各工况作用下, 主梁加速度的响应变化规律与 El Centro 地震波规律一致, 在 0.4g 工况下拉索支座体系主梁加速度略大于摩擦支座体系; 但在南昌波 0.8g 工况下, 主梁加速度峰值响应有了明显的提高. 结合南昌波各工况两种体系之间出现的差别, 下一节将从时程分析角度对此差别进行分析, 并分析拉索的限位原理.

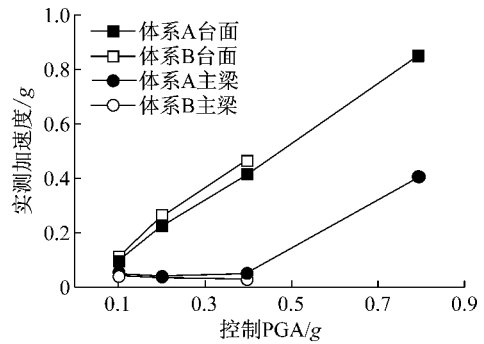
### 3.2 拉索限位原理分析

图 11 为南昌波 0.4g 工况下两种体系之间的时程对比图. 从图 11a 中可以看到, 在加载到 4 s 左右时, 拉索支座体系中主梁加速度有一处较为明显的增大; 在图 11b 中的同一时刻, 墩梁位移受到了明显的限制. 而在其他时刻, 两种体系之间的加速度响应与墩梁位移响应几乎没有区别. 说明墩梁位移的限制是由此刻拉索为主梁提供的瞬时加速度完成的.

图 12 为拉索支座体系在不同 PGA 的南昌波作



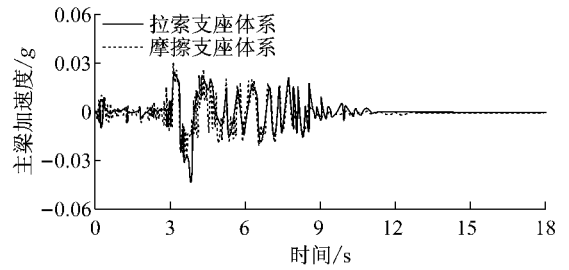
a El Centro 地震波



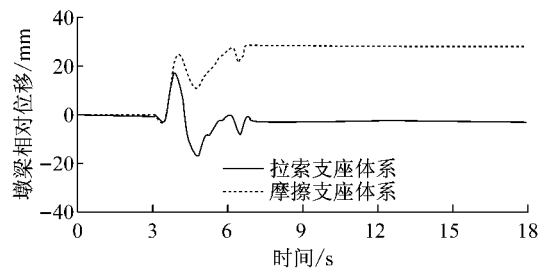
b 南昌地震波

图 10 各工况加速度峰值

Fig.10 Peak response of girder acceleration



a 主梁加速度



b 墩梁相对位移

图 11 南昌波 0.4g 工况结果对比图

Fig.11 Outcome comparison under Nanchang 0.4g test protocol

用下的时程对比图. 可以看到提高 PGA 后, 主梁在 3 个时刻有了非常明显的瞬时加速度峰值, 而这正好对应了墩梁位移较大的 3 个时刻, 进一步说明拉索是通过绷紧后为主梁提供瞬时加速度来控制墩梁间的位移增大. 由此可以看出, 拉索支座限制墩梁位移

的本质是在墩梁位移超过设计自由程后,通过拉索绷紧,为主梁提供瞬时的反向加速度。

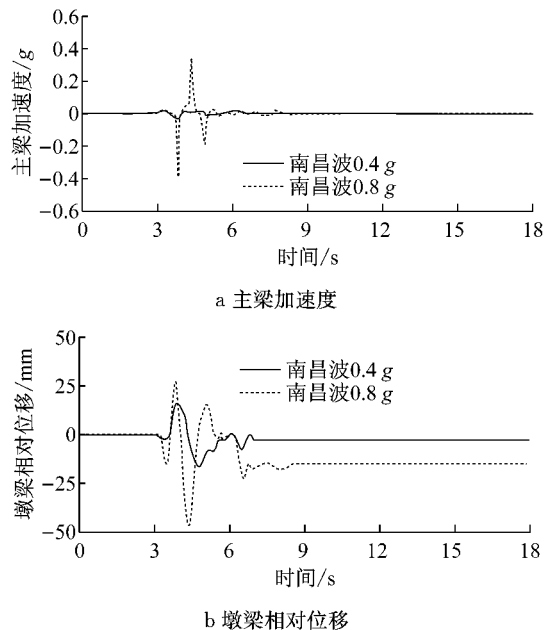


图 12 拉索支座体系结果对比

Fig. 12 Outcome comparison of cable-sliding isolation system

通过以上分析可以看出,在墩梁位移响应较小时,拉索支座具备与普通摩擦支座相似的减震特性,而在墩梁位移响应较大时,拉索支座可以有效地限制墩梁位移。

## 4 结论

本文介绍了半结构振动台试验模型,将模型按支座位置是否含有拉索分为了拉索支座体系与摩擦支座体系,并对两种体系进行了南昌地震波与 El Centro 地震波的加载,试验结果主要有:

(1) 在 El Centro 地震波各个工况作用下,两种体系的隔震效率均非常高且保持在同一水平。主梁加速度响应与墩梁位移响应在两种体系之间差别不大,拉索支座体系墩梁相对位移略小于摩擦支座体系。

(2) 在南昌地震波各个工况作用下,在较小 PGA 时,两种体系的加速度响应差别不大,拉索支座体系位移响应略小于摩擦支座体系。在较大 PGA 时,拉索可以控制墩梁相对位移,使结构不发生落

梁。拉索限制墩梁位移的原理是在墩梁位移过大时拉索为主梁提供瞬时加速度,限制主梁继续移动。

## 参考文献:

- [1] Kunde M C, Jangid R S. Seismic behavior of isolated bridges: A state-of-the-art review[J]. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2003(3): 140.
- [2] Zayas V A, Low S S, Mahin S A. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation[J]. *Earthquake Spectra*, 1990 (6): 317.
- [3] George C L, Yu-Chen O, Tiecheng N, *et al.* Characterization of a roller seismic isolation bearing with supplemental energy dissipation for highway bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(5): 502.
- [4] Reginald D, Thomas P, Roberto T L, *et al.* Full-scale tests of seismic cable restrainer retrofits for simply supported bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2003, 8(4): 191.
- [5] 彭天波,李建中,范立础. 双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2007, 35(2): 176. PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Development and application of double spherical aseismic bearing [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(2): 176.
- [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. YUAN Wancheng, WANG Binbin. Numerical model and seismic performance of cable-sliding friction aseismic bearing [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(8): 1126.
- [7] 闫聚考,彭天波,李建中. 泰州长江公路大桥振动台试验——试验设计及抗震结构体系试验结果分析[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2014, 44(2): 357. YAN Jukao, PENG Tianbo, LI Jianzhong. Shake table test of taizhou changjiang highway bridge: Test design and result analysis of aseismic structural system [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2014, 44(2): 357.
- [8] 周敕,王君杰,袁万城,等. 基于精细有限元分析的猎德大桥抗震性能评价[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2008, 36(2): 143. ZHOU Mi, WANG Junjie, YUAN Wancheng, *et al.* Seismic performance assessment of liede bridge based on detailed finite element analysis [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2008, 36(2): 143.
- [9] Padgett J E, DesRoches R, Ehlinger R. Experimental response modification of a four-span bridge retrofit with shape memory alloys [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2010, 17: 694.
- [10] Cheng Chin-Tung. Shaking table tests of a self-centering designed bridge substructure [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(12): 3426.