

山区公路桥梁高性能板式减震橡胶支座振动台试验

李 涵¹, 周应新², 钱正富², 袁万城¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 云南武易高速公路建设指挥部, 云南 昆明 650300)

摘要: 为探究高性能板式减震橡胶支座对山区常见不等墩高中小跨径连续梁桥的隔震效果, 对一座采用该类隔震支座隔震的、桥墩刚度不等的两跨连续梁桥简化模型进行了纵向振动台试验。采用多烈度多设防水准的人工波、Northridge 地震波作为激励, 分析各类地震下隔震模型的支座变形表现及结构关键位置响应的变化规律。试验结果表明该类支座的隔震效果可使主梁加速度相比台面减少达 58%, 且其翘曲滚动变形足以适应结构在 9 度 E2 地震作用下的墩梁相对位移, 震后还可回复, 无残余位移, 可以用于此类山区公路桥的隔震。

关键词: 桥梁; 减隔震; 振动台试验; 高性能板式减震橡胶支座; 不等墩高连续梁桥; 柔性加劲材料

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

Shaking Table Tests on High-Performance Isolation Rubber Bearing Isolated Highway Bridge in Mountainous Area

LI Han¹, ZHOU Yingxin², QIAN Zhengfu², YUAN Wancheng¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Yunnan Wuyi Highway Construction Headquarters, Kunming 650300, China)

Abstract: To investigate the isolation effectiveness of high-performance isolation rubber bearing (HIRB) on the small-to-medium span girder bridges in mountainous areas, shaking table tests were conducted on a two-span continuous girder bridge model in longitudinal direction. The model had different pier stiffness and was isolated by HIRB. Artificial earthquake waves and Northridge waves with multi intensities were applied as input ground motions. By studying HIRB's deforming performance and measured structural response under various excitations, it is found that HIRB could mitigate the girder acceleration by 58% at most compared with input

peak ground acceleration (PGA) and could roll over stably to satisfy the relative displacement between girder and piers under E2 earthquakes of 9-degree intensity with no residual displacement. Test results indicate the feasibility and effectiveness of applying High-Performance Isolation Rubber Bearing in continuous girder bridges with different pier heights.

Key words: bridge; seismic isolation; shaking table test; high-performance isolation rubber bearing; continuous girder bridge with different piers heights; soft reinforcement

不等墩高中小跨径连续梁桥是山区公路桥梁的主要结构形式, 因其常采用的板式橡胶支座变形能力不足, 地震时该类桥易于发生支座移位、支座脱落甚至是落梁震害。为提高公路桥梁的抗震能力, 笔者团队研发了一种具有大变形能力并兼有板式橡胶支座构造简单、造价低特点的新型减隔震支座——高性能板式减震橡胶支座(HIRB), 其由高阻尼橡胶层和柔性高强细密钢丝网加劲层层叠构成, 质量更轻, 更易于运输安装。以往研究表明, 该支座的竖向刚度可通过加密加劲层层数以达到甚至超过普通钢板加劲橡胶支座的刚度^[1-2]; 在水平力作用下, 由于其加劲层的柔性, 该支座能够发生稳定的翘曲滚动变形, 并认为支座侧表面滚动到完全水平时达到位移极限, 则该支座极限水平变形能力可以达到其总高度的 2 倍, 远超板式橡胶支座^[3-4]。当应用于矮塔斜拉桥振动台试验^[5-6]时, 该支座可通过翘曲滚动变形适应墩梁间的相对位移, 脉冲地震作用下支座无滑动失稳, 震后无残余位移。由于支座水平刚度随着翘曲滚动变形而逐渐减小, 延长了隔震结构周期, 隔震体系下主梁加速度相比固定体系可减小达 85%^[7], 但该支座针对中小跨径梁桥的减隔震效果还待研究。

收稿日期: 2018-11-02

基金项目: 山东省交通运输科技计划(2017B75); 同济大学土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE14-B-14); 国家自然科学基金(51778471)

第一作者: 李 涵(1990—), 女, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: 100805@tongji.edu.cn

通信作者: 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抗震。E-mail: yuan@tongji.edu.cn

此外,纤维加劲橡胶支座(FREI)^[8-9]也是一类可以发生翘曲滚动大变形的减隔震支座,但其加劲材料采用的是高强纤维布或纤维板,由于加劲材料成本高且与橡胶的粘结不稳定^[10],该支座还未得以在工程应用中,其在结构中的减隔震效果研究目前多针对低矮房屋结构^[11-12]或储油罐^[13],在桥梁中的应用效果^[14-15]也仍待振动台试验验证。

本文根据山区不等墩高连续梁桥的构造特征,简化设计一座由高性能板式减震橡胶支座隔震的两跨不等刚度墩连续梁桥缩尺模型,并进行振动台试验。通过分析桥梁结构在纵桥向不同设计强度、不同频谱特性的地震动激励下的加速度、位移和应变响应,研究新型支座对该结构的隔震效果、支座的稳定大变形能力和位移可回复能力,以验证该新型支座在山区不等墩高连续梁桥中的适用性。此外,通过比较结构不同墩的墩底弯矩及对应支座的变形,确定该新型支座在山区不等墩高桥梁应用时的抗震设计关键因素,为其在此类桥中的应用提供设计参考。

1 采用新型支座的隔震连续梁桥模型振动台试验

1.1 模型设计

试验在同济大学重点实验室 4 m×4 m 三方向、六自由度振动台上进行。考虑到振动台的尺寸、承载能力以及模型和振动台间的固定,在一座山区跨山谷不等墩高混凝土连续小箱梁桥(见图 1)的构造基础上,根据加速度、质量和刚度相似设计出一座跨径布置 1.7 m+1.7 m 的两跨连续梁桥缩尺模型,如图 2。为避免混凝土材料参数的不确定性,全桥采用钢结构。考虑到该试验研究的重点是支座,因此,对桥墩和主梁的设计以不影响支座受力为原则进行了简化。此外,为省去庞大的底座,边、中墩设计为等高,桥墩立柱按照与原桥刚度相似进行设计,构造如图 3,立柱采用空心方管钢,盖梁采用 H 型钢。由于连续梁桥主梁在地震时表现主要为刚体的移动,其抗弯抗扭刚度对隔震结构响应影响不大,因此该模型上部结构设计为 H 型钢组成的平面带斜撑刚架。为保证模型和原桥的动力特性相似,模型设计还考虑了桥墩和主梁的质量相似,在模型墩顶和主梁上均安装了配重箱,桥墩立柱配重按照《公路桥梁抗震设计细则》^[16]中桥墩受地震水平力简化计算方法,将按质量相似得到的模型立柱理论均布质量等效为立柱顶集中质量,叠加上盖梁配重后,边、中墩立柱顶

各配重 0.39 t、0.58 t,主梁配重 6.58 t(总重 8.54 t)。模型桥和原型桥间各关键结构特征的相似关系汇总见表 1,表中刚度、质量、时间的理论相似比分别为 1/15 (0.066 7)、1/225 (0.004 4)、 $\sqrt{1/15}$ (0.258 2),与实际相似比相差不大。此外,试验加速度相似比为 1.0。

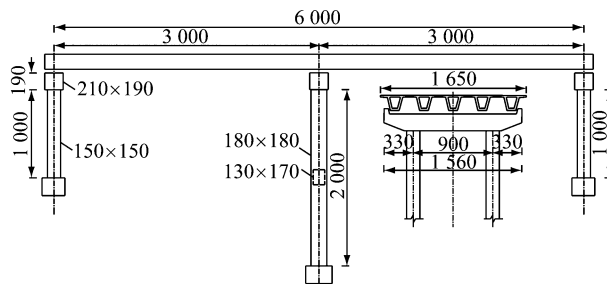


图 1 原型桥构造(单位:cm)

Fig.1 Configuration of prototype (unit: cm)

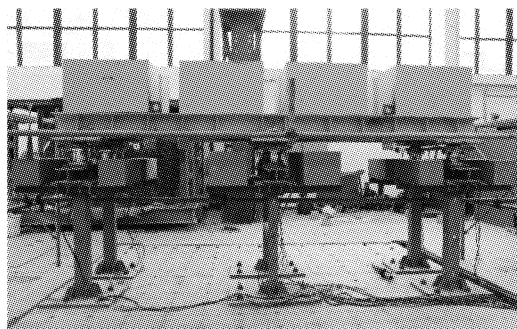


图 2 模型桥主立面

Fig.2 Bridge model elevation

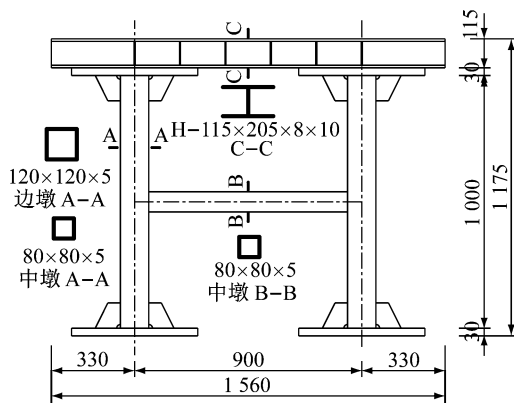


图 3 模型桥侧立面构造(单位:mm)

Fig.3 Bridge model side view (unit: mm)

1.2 高性能板式减震橡胶支座设计

为避免支座构造以及高阻尼胶料加工敏感性对支座性能影响的不确定性,试验模型采用同一型号的新型支座,并采用无阻尼填充的天然橡胶,每个盖梁顶横向布置 4 个支座,如图 4。考虑最不利受力情况,支座平面尺寸按照比最低支座恒载压应力值稍

表 1 模型和原型桥关键结构特征相似关系

Tab.1 Similarity of key structural characteristics between model bridge and prototype bridge

结构特征	边墩立柱刚度/ (kN·m ⁻¹)	中墩立柱刚度/ (kN·m ⁻¹)	主梁质量/ t	边墩立柱质量/ t	中墩立柱质量/ t	盖梁质量/ t	纵向一阶周期/ s
原型桥	37 969	9 842	1 760	58.5	168.5	161.8	0.968
模型桥	2 962	802	1.960(6.580)	0.018(0.060)	0.012(0.180)	0.064(0.660)	0.270
实际相似比	0.078 0	0.081 5	0.004 8	0.004 3	0.004 4	0.004 4	0.278 9

注:表中括号内数值为模型桥构件配重质量;盖梁配重实际合并入立柱顶配重;纵向一阶周期为固定体系下的结构有限元模型计算结果。

小的 3 MPa 来确定^[11],为 60 mm×60 mm,支座高度在保证其变形稳定性前提下(支座宽度除以高度大于 2.5)^[17]取最大,为 25 mm,支座内部构造如图 5,支座胶料硬度为 50,加劲层为柔性高强细密钢丝网,钢丝直径为 0.8 mm,支座滚动变形示意如图 6。此外,为尽可能模拟支座在实桥中与上下部结构混凝土面的接触,模型在支座位置的钢结构表面涂抹了能与钢有效粘结的环氧砂浆。

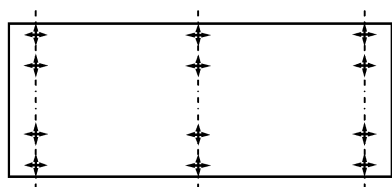


图 4 模型支座布置平面图

Fig.4 Layout of bearings

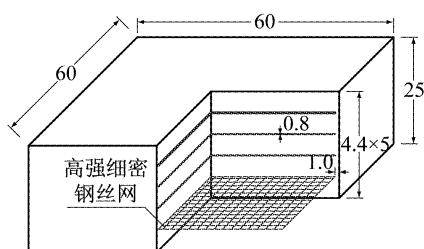


图 5 模型中新型支座内部构造(单位:mm)

Fig.5 Configuration of High-performance Isolation Rubber Bearing model(unit:mm)

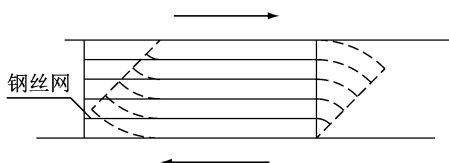


图 6 高性能板式减震橡胶支座翘曲滚动变形

Fig.6 Roll-over deformation of High-performance Isolation Rubber Bearing

1.3 地震动输入

试验地震动输入采用反应谱生成的人工波和实际地震动记录 Northridge 脉冲波。其中人工波反应谱对应 B 类桥设防^[16],设计基本加速度为 0.2g,场地为中硬土,场地特征周期是 0.45 s,结构阻尼比为

3%。2 种波的时间轴按照时间相似比压缩了 0.258,峰值加速度(PGA)则按照 8 度常遇地震(E1)、设防地震、罕遇地震(E2)以及 9 度罕遇地震来设计,本应为 0.1g、0.2g、0.34g、0.68g,试验偏保守调高后 2 级幅值后变为 0.1g、0.2g、0.4g、0.8g,用“小震、中震、大震、剧震”表示。图 7、图 8 所示分别为 2 种波 0.1g 峰值加速度下的加速度时程和反应谱。此外,试验前后分别对模型进行了 1~30 Hz 频率范围的白噪声激励来测量结构的动力特性变化。

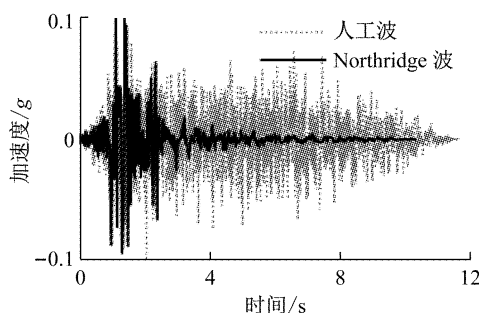


图 7 试验地震动输入加速度时程

Fig.7 Acceleration time history of input earthquakes

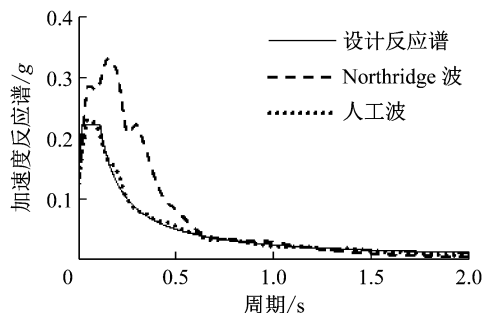


图 8 试验地震动反应谱

Fig.8 Acceleration response spectra of input earthquakes

1.4 传感器布置

模型全桥共布置 25 个传感器用以测量结构纵桥向的地震响应,各传感器布置如图 9,其中加速度计 8 个,测量主梁端部及跨中、各墩顶和 1/2 墩高处的加速度;拉线式位移计 4 个,测量主梁端部、墩顶的绝对位移;激光位移计 3 个,测量各墩顶支座的位移,即墩梁相对位移;三向力传感器 6 个,测量各立

柱顶的并排两支座的水平合力;应变片 4 个,测量边墩、中墩墩底弯矩。

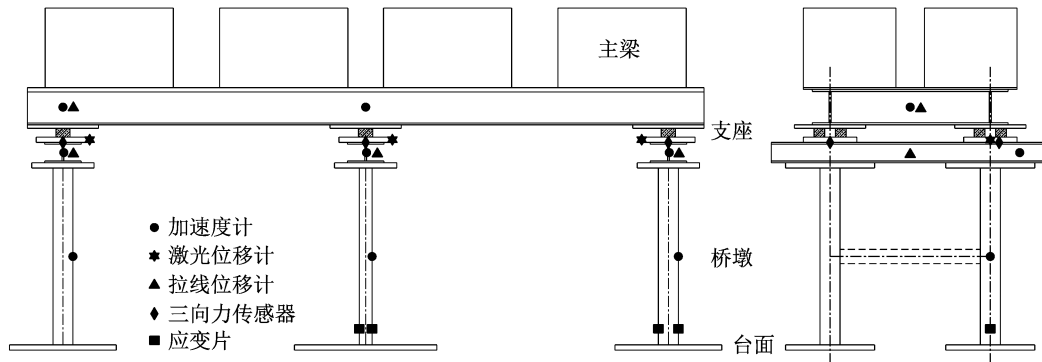


图9 模型各传感器布置

Fig.9 Layout of sensors in the bridge model

2 试验结果及分析

2.1 模型结构动力特性

模型结构的基本周期可通过各工况主梁加速度相对于台面输入加速度的传递函数来获得。试验前,白噪声工况测得的模型结构一阶周期为 0.422 s,而试验后测得的周期为 0.457 s(增大 8%)。由墩底应变数据可知,模型钢构件在试验过程中均保持弹性,因此,模型周期的延长是由支座橡胶在往复荷载下的刚度衰减导致的。图 10 所示为人工波和 Northridge 波工况模型结构基本周期随地震动峰值加速度的变化曲线。可以看出,新型支座隔震桥梁的结构动力特性会受地震动强度的影响,结构基本周期随地震动加速度峰值的增大而增大,表明该新型支座的刚度会随着位移响应的增大而减小,其恢复力模型呈非线性。此外,图 10 中相同地震动峰值加速度对应的人工波和 Northridge 波的结构响应也不同,表明该新型支座隔震桥梁的结构动力特性还会受地震动频谱特性的影响。

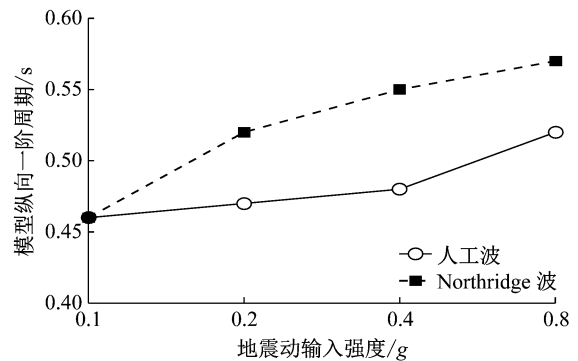


图10 不同地震动强度的模型纵向一阶周期

Fig.10 Fundamental periods of bridge model at multi PGAs

2.2 模型结构加速度响应

汇总模型不同高度位置的加速度测点所得加速度时程峰值,并以台面地震动输入加速度峰值 PGA 为基准进行归一化处理,得到各地震动不同 PGA 水平输入下结构沿高度的加速度峰值分布曲线,如图 11、图 12。随着测点高度的上移,结构加速度峰值均呈现先增大后减小的趋势,在墩顶处达到最大。其中,由于新型支座的隔震作用,主梁加速度峰值相比

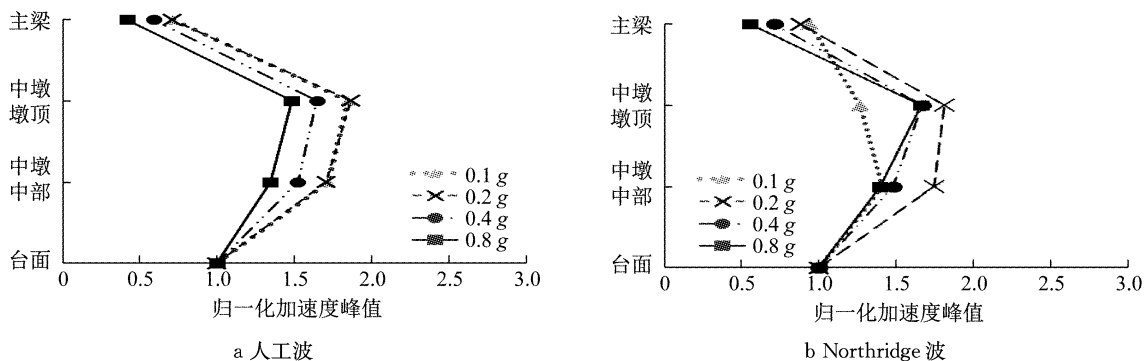


图11 不同地震强度激励下结构加速度峰值沿中墩高度分布曲线

Fig.11 Peak acceleration response envelope diagram of middle pier at multi earthquake intensities

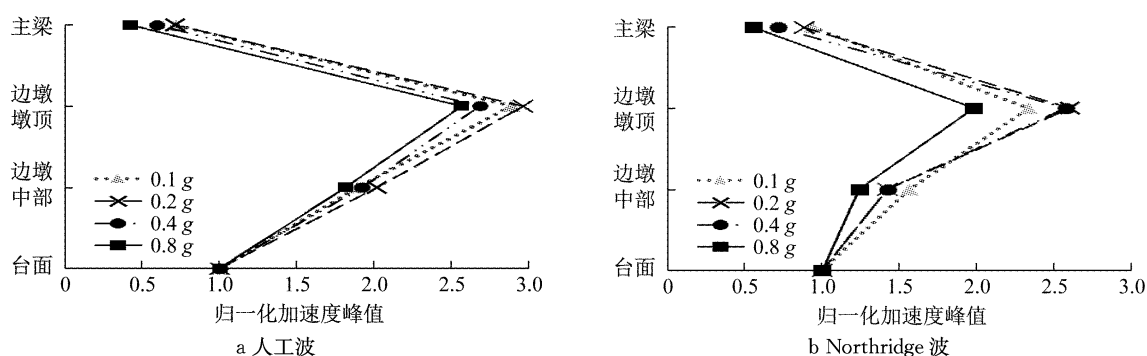


图 12 不同地震强度激励下结构加速度峰值沿边墩高度分布曲线

Fig. 12 Peak acceleration response envelope diagram of side pier at multi earthquake intensities

于墩顶加速度峰值明显减小. 将模型中支座隔震层的隔震效率定义为结构主梁加速度峰值 A_g 相比于台面加速度峰值 A_t (实测 PGA) 减小的幅度, 即 $(A_t - A_g)/A_t \times 100\%$, 其值随归一化主梁加速度峰值 A_g/A_t 减小而增大. 从图 11、12 可知, 在各地震动输入下, 随着 PGA 的增大, 归一化主梁加速度峰值逐渐减小, 因此, 相应支座的“隔震效率”会逐渐提高, 在大震 (0.4g) 和剧震 (0.8g) 下分别可以达到 41% 和 58%, 该新型支座显示出良好的隔震能力. 此外, 对比图 9 和图 10 所示的中墩、边墩位置不同高度处的结构水平加速度峰值的分布曲线, 可以看出, 由于边墩刚度较大, 边墩墩顶加速度相对于墩 1/2 高度处加速度的放大倍数要高于中墩, 且边墩的墩顶加速度明显大于中墩, 平均约为中墩墩顶加速度的 1.6 倍.

2.3 模型结构位移响应

由位移计所测结构绝对位移响应减去台面的位移即可得到结构相对台面的位移响应, 图 13 为人工波和 Northridge 波工况剧震下模型各位移测点相对台面的位移时程曲线, 可以看出, 由于模型的中墩刚度小于边墩, 中墩墩顶漂移明显大于边墩墩顶漂移, 但两者的相位一致, 边、中墩在试验过程中没有出现相向运动, 表明该模型桥的边、中墩的刚度差仍属于规则桥梁范围; 另外, 主梁的位移相位和桥墩墩顶漂移相位也一致, 两者的幅值之差即为该新型支座滚动变形量. 从各图中主梁、桥墩位移最终都归于零可知, 新型支座滚动变形后没有残余位移, 支座和结构均可复位, 表明该新型支座的变形具有可回复性. 对比桥墩墩顶漂移和主梁位移曲线还可发现, 墩顶漂移曲线中含有的高频成分在经过支座传递给主梁时被隔离掉了, 如 Northridge 波 0.8g 工况 4 s~6 s 的位移时程, 表明柔性支座不仅可以减小主梁加速度响应, 还可消除主梁的高频振动.

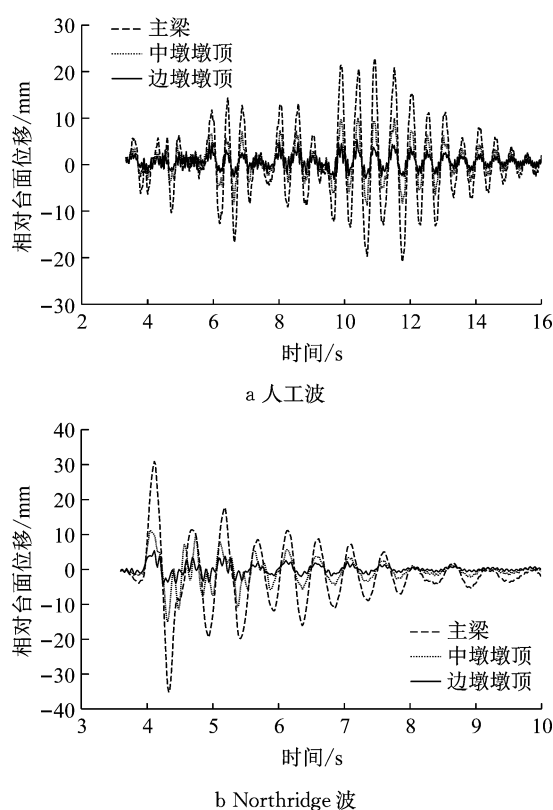


图 13 人工波和 Northridge 波工况剧震下模型各位移测点相对台面的位移时程曲线

Fig. 13 Time histories of relative displacement response at different height in the model under disaster artificial and Northridge earthquakes

将不同地震强度下台面绝对位移、桥墩墩顶漂移、支座变形、主梁相对台面位移的峰值汇总如表 2 (下文将各峰值参数简称为台面位移、墩顶漂移、支座变形和主梁位移). 从表 2 可以看出, 大震、剧震工况的支座变形均大于相应的墩顶漂移, 说明强震下的结构变形集中在柔性隔震层; 随着地震强度的增大, 支座变形与墩顶漂移的比值逐渐增大, 两地震波剧震时的边墩支座变形和墩顶漂移之比平均是小震时的 3.6 倍. 考虑到变形与刚度的关系, 该现象说明

该新型支座的刚度会随着地震强度的提高、自身变形的增大而减小,与2.1节结论一致。表2还显示,各工况边墩墩顶漂移小于中墩,这主要由模型边墩抗推刚度大于中墩抗推刚度决定的;而因各墩的墩顶漂移和支座变形之和均等于上部主梁刚体位移,所以边墩顶部的支座变形比中墩支座变形大, Northridge波剧震时相差最大,达9.5 mm(约40%支座高),因此,山区不等墩高连续梁桥需要加强矮

墩支座位移能力的设计。此外,随着地震动强度的增大,主梁位移与台面位移的比值逐渐减小,如 Northridge波工况从1.72减小到1.41,表明该新型支座隔震下的结构位移是稳定可控的。 Northridge波工况下,主梁位移响应受脉冲影响几乎达人工波工况的2倍,但该新型支座试验时既未发生滑动失稳也未达到侧表面完全水平的极限位移状态,满足了脉冲地震下模型结构的墩梁相对位移需求。

表2 各地震强度下模型结构不同测点的位移、变形峰值

Tab.2 Peak displacement and deformation of different structural components under various earthquake intensities

地震波	部位	单位: mm															
		台面位移峰值				墩顶漂移峰值				支座变形峰值				主梁位移峰值			
		小震	中震	大震	剧震	小震	中震	大震	剧震	小震	中震	大震	剧震	小震	中震	大震	剧震
人工波	边墩	4.4	9.2	18.8	33.2	2.1	2.4	3.6	5.5	1.6	5.0	11.8	17.9	3.7	7.4	15.5	23.5
	中墩					2.7	4.1	7.5	11.0	1.0	3.3	7.9	12.5				
Northridge	边墩	3.6	7.3	15.8	25.1	2.2	2.7	3.9	5.6	4.0	8.5	20.8	29.9	6.2	11.3	24.7	35.5
	中墩					3.8	5.7	11.1	15.1	2.4	5.6	13.5	20.4				

2.4 模型结构墩底弯矩响应

模型设计时将各桥墩立柱高度统一变为1 m,根据《公路桥梁抗震设计细则》的桥墩剪力简化公式可知,桥墩立柱所受剪力仅由立柱质量和刚度决定,不受桥墩高度影响,因模型立柱刚度和质量均和原桥相似,所以,模型桥立柱所受剪力可以反映原桥桥墩受力。但模型实测立柱底弯矩需要乘以高度修正系数(即理论高度除以模型高度)后才能反映原桥桥墩墩底弯矩,限于篇幅,不做过多讨论。下文所讨论的模型墩底弯矩均为将实测值修正后的理论值。

由单轴拉伸试验测得的模型钢材屈服强度为310 MPa,弹性模量为203 GPa,得到边、中墩的理论

屈服弯矩分别为22.0 kN·m、18.7 kN·m。通过桥墩墩底弯矩响应可以判断试验过程中模型下部结构是否出现屈服。以各地震动剧震时的边、中墩的墩底弯矩为例,其时程曲线如图14所示。人工波剧震工况下边、中墩墩底弯矩峰值分别为6.3 kN·m、9.3 kN·m, Northridge波剧震工况下分别为5.7 kN·m、12.1 kN·m,均未达到各墩屈服弯矩,试验中各桥墩始终保持弹性。从图14可知,各工况中墩墩底弯矩均大于边墩,再结合其他试验工况,中墩墩底弯矩峰值平均为边墩墩底弯矩峰值的1.5倍,因此,对于山区不等墩高隔震连续梁桥,更需要关注高墩的受力状态。

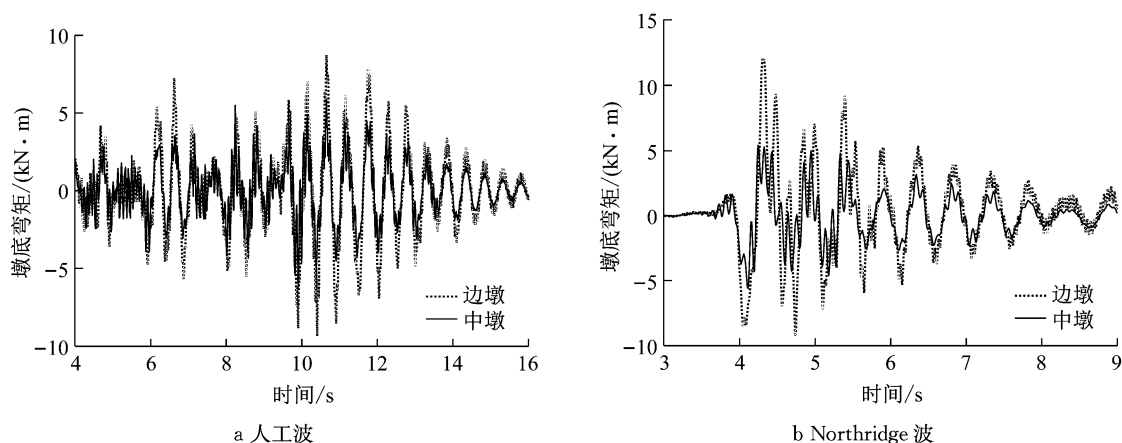


图14 地震动剧震时边墩、中墩墩底弯矩时程曲线

Fig.14 Bending moment time histories of side pier and middle pier under disaster earthquakes

2.5 隔震支座变形能力及滞回特性

试验过程中,该新型支座通过翘曲滚动变形来适应上下部结构间的相对位移,并且试验结束后仍

可恢复到初始状态,无残余位移,说明该支座的翘曲滚动变形是稳定的、可回复的。从2.2节可知,模型结构的变形主要集中在支座, Northridge波工况剧

震下,边墩支座变形峰值达 30 mm(1.2 倍支座高度),最大变形如图 15,支座侧表面还未完全侧贴到上下相邻结构的水平面上,即还未达到其极限位移能力,仅为其极限变形能力(侧表面完全侧倾)的 67%,说明该新型支座的变形能力可以满足脉冲地震剧震下的模型结构响应需求,并保有一定安全度。

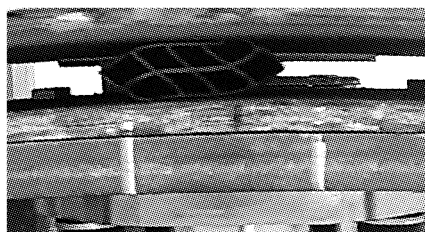


图 15 Northridge 波 0.8g 工况时支座的翘曲滚动变形

Fig. 15 Bearing roll-over deformation under Northridge 0.8g case

图 16 所示为边墩支座在人工波 0.8g 以及 Northridge 波 0.8g 下的滞回曲线,由于支座橡胶材料为天然胶,无阻尼填充,因此,支座的滞回曲线不够饱满,但可以看出,支座大变形时的等效刚度比小变形时的刚度有所降低,这是由于支座大变形时的翘曲滚动引起的,表明该支座恢复力模型呈非线性,

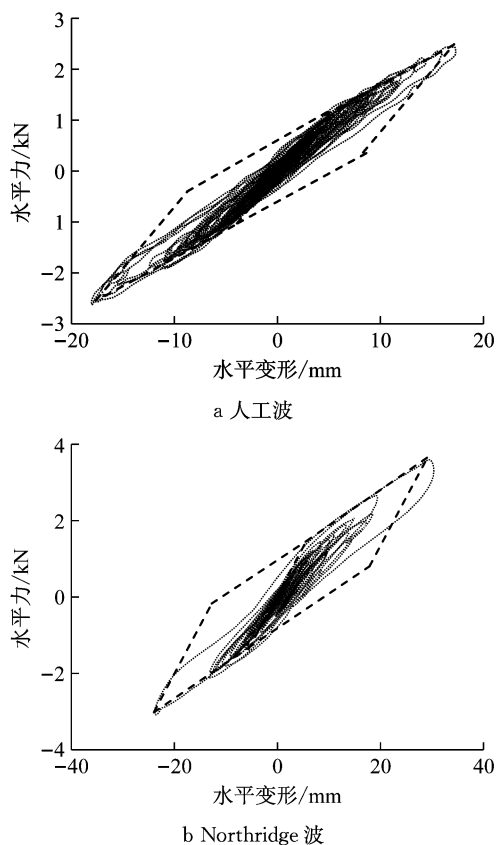


图 16 各地震动剧震时边墩支座的滞回曲线

Fig. 16 Bearing hysteresis loops at side pier under disaster earthquakes

尤其是 Northridge 工况,支座的变形更大,支座滞回曲线的非线性也更明显,并且如图 16 所示,该支座的恢复力模型可近似为双线性。

3 结语

以上对振动台试验结果的讨论可为高性能板式减震橡胶支座在山区不等墩高连续梁桥中的应用提供理论依据和参考,具体如下:

(1) 高性能板式减震橡胶支座可通过翘曲滚动变形来满足地震下模型结构墩梁间的相对位移需求,在 9 度罕遇脉冲地震下支座最大水平变形达到 1.2 倍支座高,且仍保持稳定;试验结束后,支座和结构均能复位,降低了结构的落梁风险。

(2) 高性能板式减震橡胶支座的翘曲滚动能减小该支座的等效刚度,延长结构的周期,实现隔震;地震下,该支座可有效减小结构主梁的加速度响应,最高达 58%,且其隔震效率随着地震动强度的增大而增大,提高了强震下结构的可靠度;此外,支座滞回曲线显示其恢复力模型呈双线性。

(3) 高性能板式减震橡胶支座在不等墩高连续梁桥中应用时,矮(边)墩支座的变形大于高(中)墩支座,试验时最多相差 10 mm(40% 支座高),另外,高(中)墩的墩底弯矩大于矮(边)墩,试验时的中墩弯矩峰值平均为边墩的 1.5 倍,因此,在抗震设计时应提高矮墩的支座位移能力,增强高墩的抗弯能力。

本文选用的新型支座型号对于边墩和中墩是统一的,而实际工程中为减小相邻墩反向振动的风险,支座设计应使全桥的桥墩-支座串联体系刚度协同,后续可对考虑协同设计的新型支座的隔震效果进行分析,并可进一步探究不等墩高连续梁桥跨径、墩高变化对该支座隔震效率的影响规律,以确定高性能板式减震橡胶支座对山区公路桥的跨径、墩高的最佳适用范围。

参考文献:

- [1] 李涵,袁万城,田圣泽,等. 高性能板式减震橡胶支座竖向刚度研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 214.
LI Han, YUAN Wancheng, TIAN Shengze, et al. Research on vertical stiffness of High-performance Isolation Rubber Bearings[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 214.
- [2] 李涵,袁万城,田圣泽,等. 钢丝网复合橡胶减隔震支座试验及有限元模拟[J]. 山东交通学院学报, 2015, 23(3): 49.
LI Han, YUAN Wancheng, TIAN Shengze, et al. Finite

- element simulation and experiment on steel mesh reinforced elastomeric isolation bearing[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2015, 23(3): 49.
- [3] 李涵,袁万城,田圣泽,等. 钢丝网复合橡胶减隔震支座拟静力试验与恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 1(6):144.
- LI Han, YUAN Wancheng, TIAN Shengze, *et al.* Quasi-static test and research on the restoring force model of the steel mesh reinforced elastomeric isolation bearing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics in China, 2015, 1(6):144.
- [4] LI Han, TIAN Shengze, DANG Xinzh, *et al.* Performance of steel mesh reinforced elastomeric isolation bearing: Experimental study[J]. Construction & Building Materials, 2016, 121:60.
- [5] TIAN Shengze, YUAN Wancheng, YANG Haolin, *et al.* Applicability study of travelling-wave effect on multi-tower extradosed cable-stay bridges using symmetric analyzing method[C]// 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering.[s.l.]: Atlantis Press, 2015: 1604-1609.
- [6] YANG Haolin, PANG Yutao, TIAN Shengze, *et al.* Case study of the seismic response of an extra-dosed cable-stayed bridge with cable-sliding friction aseismic bearing using shake table tests[J]. Structural Design of Tall & Special Buildings, 2017, 26(9):1398.
- [7] LI Han, TIAN Shengze, YUAN Wancheng, *et al.* Performance evaluation of high-performance isolation rubber bearings for the seismic mitigation of bridge structures [C]// Structures Congress. [s.l.]: The American Society of Civil Engineerings, 2017:24-35.
- [8] KELLY J M. Analysis of fiber-reinforced elastomeric isolators [J]. Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE), 1999, 2(1): 19.
- [9] PENG Tianbo, ZHANG Hua, LI Jianzhong, *et al.* Pilot study on the horizontal shear behaviour of FRP rubber isolators[J]. Journal of Vibration & Shock, 2009, 28(5):127.
- [10] TOOPCHI-NEZHAD H, TAIT M J, DRYSDALE R G. Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2008, 15(6): 876.
- [11] TOOPCHI-NEZHAD H, TAIT M J, DRYSDALE R G. Shake table study on an ordinary low-rise building seismically isolated with SU-FREIs (stable unbonded-fiber reinforced elastomeric isolators)[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009, 38(38): 1335.
- [12] 黄襄云,周福霖,曹京源,等. 纤维橡胶隔震结构模拟地震振动台试验研究及仿真分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2010, 9(5):21.
- HUANG Xiangyun, ZHOU Fulin, CAO Jingyuan, *et al.* Simulating earthquake shaking table tests of isolation structure with fiber-reinforced isolator and finite element analysis[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2010, 9(5):21.
- [13] MORDINI A, STRAUSS A. An innovative earthquake isolation system using fiber reinforced rubber bearings[J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2739.
- [14] DEZFULI F H, ALAM M S. Multi-criteria optimization and seismic performance assessment of carbon FRP-based elastomeric isolator [J]. Engineering Structures, 2013, 49: 525.
- [15] SOLEIMANLOO H S, BARKHORDARI M A. Mechanical characteristics and application of fiber-reinforced elastomeric bearings for seismic isolation and retrofitting of bridges[J]. Trends in Applied Sciences Research, 2014, 9(1): 31.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01—2008 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges: JTG/T B02-01—2008 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2008.
- [17] TOOPCHI-NEZHAD H. Horizontal stiffness solutions for unbonded fiber reinforced elastomeric bearings[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2014, 49(3): 395.