

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.07.049

行人激励载荷下大跨径异形天桥抗震支座设计研究

孙良凤

(浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:为了解决抗震支座弯矩受到行人不确定激励载荷影响,出现参量获取不全面的现象,导致支座抗震效果不佳这一问题,进行了行人激励载荷下大跨径异形天桥抗震支座设计研究。首先,考虑到行人对桥梁激励的不确定性,设置了多种载荷激励类型,并提出利用区间过程法来描述桥上行人的不确定激励,使用自相关系数函数分析在行人激励载荷作用下的桥梁非随机振动情况;其次,利用有限元软件中的单元构造了抗震支座模型,并对桥梁位移、桥墩弯矩、桩基弯矩进行数值模拟;最后,将支座参量数值模拟结果代入有限元模型中,设计出一种双曲面球抗震支座结构。结果表明,设计的支座在慢跑、快跑情况下纵向弯矩与实际数据之间的最大误差分别为25 kN·m、250 kN·m,横向弯矩与实际数据一致,说明根据数值模拟结果设计的支座能够起到良好减震效果。

关键词:行人激励载荷;大跨径;异形天桥;抗震支座

中图分类号: U441+.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)07-0206-04

0 引言

大跨径异形天桥支座是连接桥梁上下结构的重要组成部分,能够将桥梁上的载荷转移到桥墩上,使支座结构承载能够满足安全施工要求。在工程实践中,人们对行人激励载荷下的桥梁抗震性能问题进行了研究。在此之前,大多数研究都集中在单一载荷作用下。近年来,由于技术进步,多个载荷作用下的桥梁问题越来越受到重视,而对大跨径异形天桥的影响则是典型的多个载荷作用问题。由于行人激励载荷的影响,很容易引起大跨径异形天桥上下结构出现较大的位移,从而造成支座破坏,出现梁体碰撞、落梁,甚至坍塌等危险。因此,在行人激励载荷作用下,天桥抗震支座是确保结构稳定的关键。王修勇等^[1]提出了基于TMD的桥梁振动控制方法,该方法通过构建TMD调谐质量阻尼函数,识别碰撞力模型参数,分析桥梁涡激振动效果;孙治国等^[2]提出了基于RSC体系的抗震控制方法,通过构建双层排架墩抗震数值分析模型来计算排架墩上层间位移角,并利用该位移角设计抗震结构,避免桥梁排架墩损伤。但上述方法只是对行人过桥进行随机分析,要获得精确概率分布和概率密度函数,需要大量采样数据,这在工程实践中是很难实现的。因此,本文进行了行人激励载荷下大跨径异形天桥抗震支座设计研

究,通过区间过程法来分析桥梁非随机振动情况,采用一种更为直观的描述方法来设计抗震支座。

1 行人激励载荷作用下桥梁非随机振动分析

行人在移动过程中,对大跨径异形天桥的激励往往具有不确定性,因此在构建行为激励载荷模型后,应输入不同工况参数。使用区间过程法来描述行人激励载荷作用在大跨径异形天桥的不确定性激励,并推导出任意两端点间的自相关系数函数,进而分析出桥梁非随机振动特性。

1.1 行人激励载荷模型构建

在大跨径异形高架桥梁中,行人的相位、步态频率存在差异。在分析大跨径异形桥行人活动规律基础上,发现行人激励载荷是由相同频率行人随机移动引起的^[3]。由此构建的行人激励载荷模型 $P(t)$ 为:

$$P(t) = G \left[1 + \sum_{i=1}^t \gamma_i \sin(2i\pi \eta t - \theta_i) \right] \quad (1)$$

式中: G 为人体体重; γ_i 为第*i*阶载荷因子; η 为行人运动频率; t 为运动时间; θ_i 表示振动相位角。

不同行人行为类型对应不同激励频率,依据不同行人运动方式,分析天桥上步行人员单位面积^[4]。为了全面分析行人激励载荷对大跨径异形天桥支座影响,将工况设置为天桥上的行人进行的各种动作。

当行人慢走时,行人激励频率为1.0~2.0 Hz,行人密度为0.5 m²,行人处于一种舒适活动的状态;当行人快走时,行人激励频率为2.0~3.0 Hz,行人密度为0.3 m²,行人处于一种舒适活动的状态;当行人慢跑

收稿日期: 2022-09-08

作者简介: 孙良凤(1985—),女,硕士,高级工程师,主要从事桥梁设计工作。

时,行人激励频率为 3.0~4.0 Hz,行人密度为 0.3 m²,行人处于一种准自由状态;当行人快跑时,行人激励频率为 4.0~5.0 Hz,行人密度为 0.3 m²,行人处于一种完全自由状态^[5]。

1.2 基于区间过程的桥梁非随机振动分析

行人是一个不断运动的目标,当运动载荷自身重量比桥梁自身重量小时,运动恒力求解可以得到一个近似解^[6-7]。在任何时间,负载对桥梁作用都是由其自重减去重量所产生的惯性,假设滚动体始终与桥面保持接触,也就是加速度相等^[8-9]。如此,桥梁所承受的力 $F_{梁}(x,t)$ 为:

$$F_{梁}(x,t) = m_{人}g = m_{人}\varepsilon(x,t) \quad (2)$$

式中: $m_{人}$ 表示人重; g 表示加速度常量; $\varepsilon(x,t)$ 表示挠度; x 表示位置; t 表示运动时间。

在行人运动过程中,行人对桥梁的激励作用具有不确定性^[10]。为此,提出利用区间过程来描述桥上行人的不确定激励,并导出了上、下边界函数,以分析在行人激励载荷作用下的桥梁非随机振动。在区间处理过程中,将任何时间变量的不确定值用一个有界封闭区间来表达,而任何时间点间的相关性则用定义自相关系数函数来描述^[11]。

设存在不确定过程 $\{a(t), t \in T\}$,其中 T 是时间参数的 t 集合, $a_{min}(t_i)$ 为下限最小值函数, $a_{max}(t_i)$ 为上限最大值函数,对于任意时刻 t_i 所有可能的值属于区间 $[a_{min}(t_i), a_{max}(t_i)]$,则称该过程是区间过程^[12]。对于该区间过程,任意时刻下的自相关系数函数 $\lambda(t_i, t_j)$ 为:

$$\lambda(t_i, t_j) = \frac{\text{Cov}(a_i, a_j)}{\sqrt{D(a_i)} \sqrt{D(a_j)}} \quad (3)$$

式中: a_i, a_j 分别表示区间过程参量; $\text{Cov}(a_i, a_j)$ 表示自协方差函数; $D(a_i), D(a_j)$ 表示 2 个参量对应的方差函数。

如果区间变量在 $[-1, 1]$ 之间,那么说明 $|\lambda(t_i, t_j)| \leq 1$ 。 $|\lambda(t_i, t_j)|$ 数值越大,说明区间变量间的相关性越强。当 $|\lambda(t_i, t_j)|$ 数值接近于 1 时,说明区间变量一致,由此确定 2 个区间变量呈完全线性相关关系^[13]。

2 行人激励工况下双曲面球抗震支座设计

分析基于区间过程的桥梁非随机振动可发现,任意两个端点之间的变量呈完全线性相关关系。将该关系输入到构建的有限元抗震支座模型中,获取支座参量。依据参量,设计一种能在行人激励载荷作用下起到抗震缓冲效果的双曲面球抗震支座。

2.1 有限元抗震支座模型构建

利用 Midas 软件对整个支座进行建模,并在此基础上利用有限元软件中的单元来构造抗震支座有限元模型。

该模型考虑载荷作用下的结构特征,根据行人激励载荷对桥梁作用的不同,选择球面不锈钢滑板作为连接单元,对桥梁位移、桥墩弯矩、桩基弯矩进行数值模拟^[14]。

2.2 支座参量数值模拟

为了模拟支座参量,需计算作用在桥梁、桥墩、桩基之间的土弹簧值 K ,其表达式为:

$$k = hLad \quad (4)$$

式中: h 为桥梁到桩基的土层厚度; L 为桥梁桩基宽度; a 为土系数; d 为桥梁、桥墩、桩基中点到地面距离。

为了设计抗震支座,将桥梁、桥墩、桩基模拟为考虑了抗弯变形的三维弹性单元,通过计算结构响应,对桥梁位移、桥墩抗弯能力、桩基抗弯能力进行分析。

2.2.1 桥梁位移

由于行人激励载荷的存在,桥梁支撑和连接两端发生了巨大位移,从而使相邻结构发生碰撞,引起桥梁结构失效。因此,设计如下抗震支座位移响应参量:#1 梁支座横向位移为 0.050 m、纵向位移为 0.055 m;#2 梁支座横向位移为 0.044 m、纵向位移为 0.042 m;#3 梁支座横向位移为 0.044 m、纵向位移为 0.042 m;#4 梁支座横向位移为 0.046 m、纵向位移为 0.068 m。

输入上述抗震支座位移响应参量,#3 梁支座与 #2 梁支座横向位移参量一致,#4 梁支座横向位移参量比 #1 梁小,但纵向位移参量比 #1 梁大,由此确定的参量能够减少落梁问题出现的次数。

2.2.2 桥墩弯矩

在行人激励载荷作用下,由于采用橡胶支撑的墩柱承受弯矩超出了其承受限值,从而导致了桥墩柱结构失效。因此,设计如下抗震桥墩立柱承载能力参量:#1 桥墩立柱弯矩为 580.2 kN·m;#2 桥墩立柱弯矩为 720.3 kN·m;#3 桥墩立柱弯矩为 720.4 kN·m;#4 桥墩立柱弯矩为 3 109.6 kN·m。

输入上述桥墩立柱弯矩参量,#1 桥墩立柱弯矩最小,#2、#3 桥墩立柱弯矩基本一致,#4 桥墩立柱弯矩最大,是 #1 桥墩立柱弯矩的 5 倍。如此选取的参量能够有效提高安全系数,不会发生抗弯承载力不

足的情况。在行人激励工况下,采用抗震支座的桥墩立柱不会出现结构性破坏。

2.2.3 桩基弯矩

大跨径异形天桥受到横向和纵向行人激励载荷影响,使桩基实际承载弯矩与理想承载弯矩差异较大,对整个桩基结构造成了严重的破坏^[15]。因此,设计如下抗震桩基抗弯刚度参量:#1 桩基顶部弯矩为 370.5 kN·m;#2 桩基顶部弯矩为 422.5 kN·m;#3 桩基顶部弯矩为 428.1 kN·m;#4 桩基顶部弯矩为 382.7 kN·m。

输入上述桩基顶部弯矩参量,4 个桩基顶部弯矩相差不大,能够保证桩基结构安全,即使在不同行人激励载荷情况下也能保持桥梁桩基的稳定性。

2.3 双曲面球抗震支座设计

将支座参量数值模拟结果代入有限元模型中,得到一种双曲球面支撑结构。该结构采用剪切螺栓的球形不锈钢滑板,上下底板和中底板的接触表面为滑动面,下底板和中底板的接触表面为旋转面。所设计的双曲面球抗震支座结构如图 1 所示。

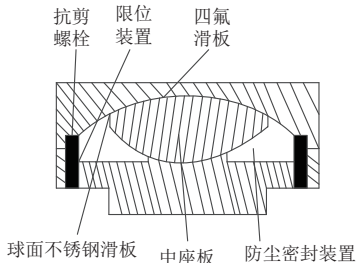


图 1 双曲面球抗震支座结构示意图

由图 1 可知,采用双曲球面支撑结构进行桥梁结构设计,可以极大地改善结构的抗震性能。在安装时,必须采用锚杆将支架与桥墩、桥台顶面固定,并将桥梁上部结构置于支架上。该支承的作用机制是:当无行人激励载荷作用时,上部结构的横向受力相对较低,轴承的滑动面因剪切螺栓而不发生滑动,此时的抗震支座就像是一个固定支架,它的作用是承载垂直荷载;当有行人激励载荷作用时,桥梁支撑和连接两端产生了位移,此时支撑部位承受了很大横向荷载,在侧向作用力达到某一水平时,剪力锚将被截断,滑块摩擦副能沿侧向滑移,从而减缓桥梁支撑和连接两端的相对移动,降低桥体损伤。因为支撑结构是球形结构,所以桥梁自重将会产生球形纵向荷载,从而使其恢复到初始状态。桥梁支撑和连接两端相对滑动时,由于摩擦阻力存在,会抵消行人激励载荷作用力,起到缓冲效果,使桥梁寿命得以延长。同时,由于桥墩弯矩和桩基弯矩得到了有效控制,不会

因结构弯曲而破坏桩基,因此设计的双曲面球抗震支座结构承载力较高,不会被轻易损坏。

3 实桥测试

3.1 工程背景与试验条件设置

以大跨径异形天桥(80 m+110 m+70 m)为研究对象,该桥面全宽 35 m,分幅布置,桥墩距离地面高约 15 m,桩基长度为 50 m,桩基直径为 1.5 m。

天桥全景及其模拟图见图 2。



图 2 天桥全景及其模拟图

设置行人通过桥梁时对天桥激励频率为 1.0~2.5 Hz;当频率大于 2.5 Hz 时,行人在做跑步和跳跃动作。为了全面分析大跨径异形天桥抗震支座在行人激励载荷下的抗震效果,设置不同载荷激励类型。

在不同行人激励载荷作用下,图 3 显示了行人激励与桥梁振动之间的关系。

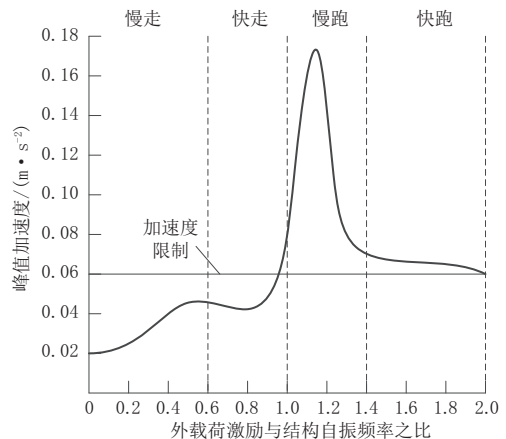


图 3 行人激励与桥梁振动之间关系

由图 3 可知,当频率之比达到 1.2 时,桥梁峰值加速度达到了最大值,此时桥梁共振效果明显。慢跑和快跑的峰值加速度均超过规范限值,这时设计的抗震支座起到抗震作用。

行人在快跑和慢跑状态下,其激励载荷对抗震

支座横向和纵向弯矩的影响如表 1 所示。

表 1 行人激励载荷对抗震支座横向和纵向弯矩的影响 单位:kN·m

时间 /min	快跑		慢跑	
	横向	纵向	横向	纵向
5	75 000	35 000	112 500	48 000
10	62 500	50 000	100 000	52 000
15	74 500	58 000	86 000	64 000
20	100 000	56 000	95 000	54 000
25	75 000	64 000	120 000	58 000
30	92 500	62 000	120 000	52 000

3.2 试验结果与分析

通过上述分析可知,在一定行人密度的区域,支座起到抗震作用是行人慢跑和快跑 2 种情况。对这 2 种情况下的大跨径异形天桥支座抗震效果进行对比分析。

3.2.1 慢跑情况

分别使用基于 TMD 的桥梁振动控制方法、基于 RSC 体系的抗震控制方法和行人激励载荷作用下的抗震方法,对比分析一定密度行人慢跑情况下支座横向和纵向弯矩,如图 4 所示。

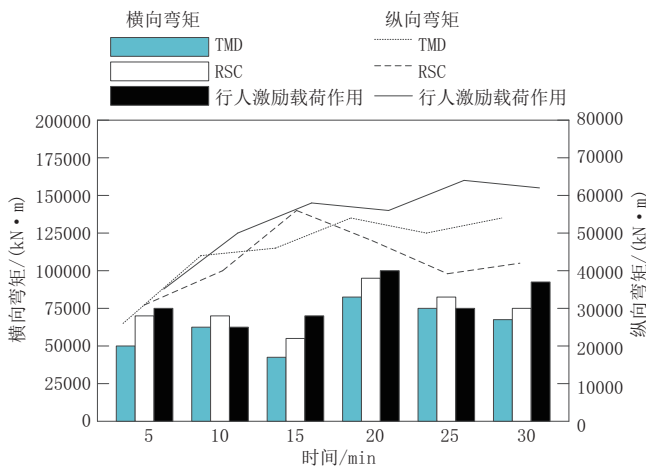


图 4 慢跑情况下 3 种方法横向和纵向弯矩对比分析

由图 4 可知,使用基于 TMD 的桥梁振动控制方法,横向、纵向弯矩与表 1 实际数据分别存在最大为 32 000 kN·m、9 000 kN·m 的误差;使用基于 RSC 体系的抗震控制方法,横向、纵向弯矩与表 1 实际数据分别存在最大为 7 500 kN·m、25 000 kN·m 的误差;使用行人激励载荷作用下的抗震方法,横向弯矩与表 1 实际数据一致,纵向弯矩与表 1 实际数据存在最大为 25 kN·m 的误差。

3.2.2 快跑情况

分别使用基于 TMD 的桥梁振动控制方法、基于 RSC 体系的抗震控制方法和行人激励载荷作用下的

抗震方法,对比分析一定密度行人快跑情况下支座横向和纵向弯矩,如图 5 所示。

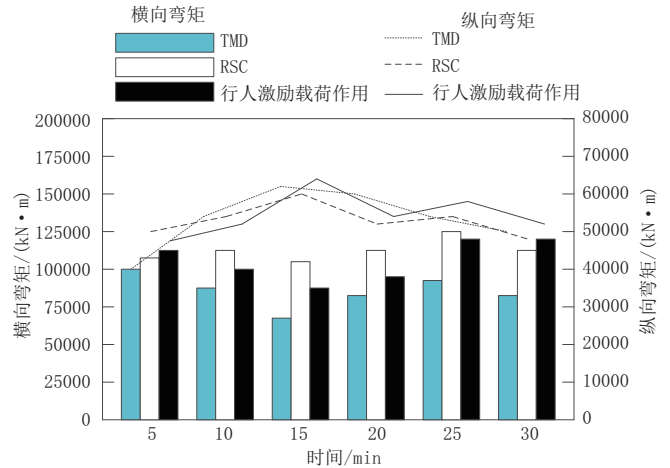


图 5 快跑情况下 3 种方法横向和纵向弯矩对比分析

由图 5 可知,使用基于 TMD 的桥梁振动控制方法,横向弯矩与表 1 实际数据存在最大为 37 500 kN·m 的误差,纵向弯矩与表 1 实际数据存在最大为 8 000 kN·m 的误差;使用基于 RSC 体系的抗震控制方法,横向弯矩与表 1 实际数据存在最大为 17 500 kN·m 的误差,纵向弯矩与表 1 实际数据存在最大为 4 000 kN·m 的误差;使用行人激励载荷作用下的抗震方法,横向弯矩与表 1 实际数据一致,纵向弯矩与表 1 实际数据存在最大为 250 kN·m 的误差。

通过上述分析结果可知,使用行人激励载荷作用下的抗震方法能够获取精准行人激励载荷作用下支座横向和纵向弯矩数据,根据该数据设计的支座能够起到良好抗震效果。

4 结语

通过对行人激励载荷下大跨径异形天桥抗震支座进行的设计研究可知,明确抗震设计中各项参数是保障天桥抗震支座设计的关键。采用基于区间过程的桥梁非随机振动分析方法,使天桥结构设计具有一定可靠性。在后台通过使用双曲面球型支座能够达到设防目标,对大跨径异形天桥抗震项目拓展起到积极作用。

参考文献:

- [1] 王修勇,胡仁康,郭晨枫,等.单面碰撞 TMD 及其桥梁涡激振动控制研究[J].振动与冲击,2020,39(1):169-174.
- [2] 孙治国,赵泰儀,王东升,等.基于 RSC 体系的双层桥梁排架墩地震损伤控制设计[J].中国公路学报,2020,33(3):97-106.
- [3] 李剑,李祁伟.基于拟静力试验的桥梁高桩承台基础抗震延性分析[J].建筑技术,2021,52(10):1209-1212.
- [4] 陈方有,叶爱君,韩大章,等.主塔塔型对大跨度钢塔斜拉桥地震反应的影响[J].结构工程师,2020,36(1):74-78.

(下转第 213 页)

倍极限承载力状态下最大 Mises 应力为 3.5 MPa, 在 1.0 倍极限承载力状态下最大 Mises 应力为 17.59 MPa。最大应力位置出现在组合梁 1/4 截面。

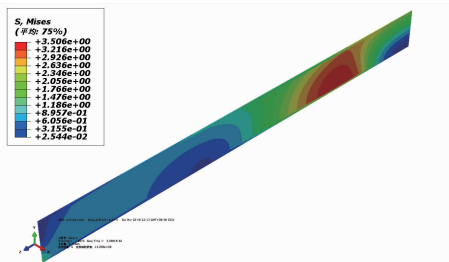


图 10 0.5 倍极限承载力平腹板 Mises 应力云图

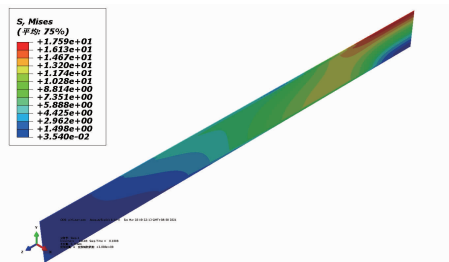


图 11 1.0 倍极限承载力平腹板 Mises 应力云图

由上述现象可知,加载过程中平钢腹板 Mises 应力均小于波形钢腹板。

4 结论

本文以某跨径为 6.5 m 的新型波形钢腹板组合槽形梁为依托工程,建立 1/4 ABAQUS 非线性波形钢腹板、平钢腹板组合梁有限元模型。通过对该模型进行弯曲破坏加载分析,得出以下结论:

(1)与平钢腹板混凝土槽形组合梁相比,波形钢腹板混凝土槽形组合梁弯曲承载能力仅提高 1.82%,波形钢腹板对强度的影响并不明显,但平钢腹板极易出现屈曲破坏状态。

(2)波纹钢腹板混凝土槽形组合梁、平钢腹板混凝土槽形组合梁荷载 - 位移曲线,总体上均具有显著的弹性阶段、弹塑性阶段、弱化阶段。

(3)弹性阶段,组合梁荷载 - 位移曲线拟合程度较高,两者的位移、荷载均一致;弹塑性阶段,组合梁荷载 - 位移曲线开始出现较大差异,平钢腹板组合梁位移较大;弱化阶段,平钢腹板混凝土槽形组合梁强度下降速率较快。

(4)加载过程中,平钢腹板组合梁刚度明显弱于波纹钢腹板,平钢腹板 Mises 应力均小于波纹钢腹板。

参考文献:

[1] 杨得旺. 钢 - 混凝土组合梁在我国铁路桥梁中的应用[J]. 山西建筑, 2020, 46(6):131-133.

[2] 于广龙. 简支钢 - 混凝土组合箱梁有限元分析[J]. 山西建筑, 2017, 43(28):39-40.

[3] 王强. 波纹钢腹板箱梁桥截面优化设计和剪力键疲劳性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.

[4] 雷聪, 万水, 王毅力. 波纹钢腹板组合梁与钢桁腹组合梁的安全性能和使用性能研究[J]. 世界桥梁, 2015, 43(4): 30-36.

[5] 袁鹏飞. 波纹钢腹板组合槽形梁桥静动力学性能研究[D]. 广州: 东南大学, 2019.

(上接第 209 页)

[5] 徐超, 罗敏敏, 任非凡, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1):179-186, 194.

[6] 开永旺. 考虑实际场地的矮塔斜拉桥非线性地震响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(2):417-424.

[7] 石岩, 钟正午, 秦洪果, 等. 装配铅挤压阻尼器的摇摆 - 自复位双柱墩抗震性能及设计方法[J]. 工程力学, 2021, 38(8):166-177, 203.

[8] 李敏峰, 徐永峰. 强震区不对称连续梁桥地震响应及性能评价[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5):1276-1282.

[9] 俞瑞芳, 曲国岩, 张冬锋. 空间相关多点非平稳地震动合成及其对大跨结构响应的影响[J]. 振动工程学报, 2020, 33(5):1013-1023.

[10] 李子奇. 铁路新型柱板式高墩抗震性能试验及数值模拟方法研究

[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9):1944.

[11] 刘正楠, 陈兴冲, 张永亮, 等. 考虑行波效应的无砟轨道铁路桥梁纵桥向地震响应[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4):142-149.

[12] 王猛, 李林虎, 郭猛闯. 变截面圆端空心桥墩抗震性能目标及性能水准量化[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2):90-97.

[13] 国巍, 王阳, 葛苍瑜, 等. 近断层地震动下高速铁路多跨简支梁桥震致破坏特征[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17):210-218.

[14] 国巍, 王阳, 宗绍哈, 等. 高速铁路桥梁中旋转摩擦阻尼器减震性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2):740-745.

[15] 许成祥, 王粘锦. 双层高架桥框架式桥墩地震损伤试验[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(5):49-56.